

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Branimir Prgomet**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentori:

Doc. dr. sc. Dragan Žeželj, dipl. ing.

Student:

Branimir Prgomet

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Draganu Žeželju na ukazanom vremenu i povjerenju te na korisnim savjetima i uputama pruženim prilikom izrade ovog rada.

Posebna i najveća zahvala mojim roditeljima. Bez njihove pomoći i podrške, kako one materijalne, tako i moralne, završetak mog studija i izrada ovog rada nikada ne bi bili mogući. Hvala im na uloženom povjerenju, vremenu koje su potrošili na mene, što su bili uz mene uvijek i u svakom trenutku, a posebno im hvala na tome što su me uspjeli istrpiti tokom čitavog studija ☺.

Branimir Prgomet

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	XII
SUMMARY .....	XIII
1. UVOD.....	1
1.1. Konstruktivne izvedbe multiplikatora vjetoragregata.....	5
1.2. Uležištenja, ručice i kućište multiplikatora vjetroagregata.....	12
2. OPIS MULTIPLIKATORA VJETROAGREGATA IZ ZADATKA .....	17
3. PRORAČUN .....	25
3.1. Ulazne proračunske veličine .....	25
3.2. Orijentacijski proračun modula zupčaničkog para (drugog stupnja multiplikatora) .	25
3.3. Orijentacijski proračun modula planetarnog prijenosnika (prvog stupnja multiplikatora).....	27
3.3.1. Brzine vrtnje pojedinih elemenata planetarnog stupnja.....	27
3.3.2. Brojevi zubi pojedinih elemenata planetarnog prijenosnika.....	27
3.3.3. Proračun okretnih momenata .....	28
3.3.4. Orijentacijski proračun modula para $z_4$ - $z_3$ .....	28
3.3.5. Orijentacijski proračun modula para $z_2$ - $z_1$ .....	30
3.4. Izbor faktora pomaka profila.....	31
3.4.1. Faktor pomaka profila za par $z_4$ - $z_3$ .....	31
3.4.2. Faktor pomaka profila za par $z_2$ - $z_1$ .....	32
3.4.3. Faktor pomaka profila za par $z_6$ - $z_5$ .....	32
3.5. Dimenzije zupčanika u odnosu na korekcijske faktore.....	33
3.5.1. Kontrola tjemenih zračnosti .....	35
3.6. Kriterij susjednosti .....	36
3.7. Ostvarivanje potrebne bočne zračnosti primicanjem alata .....	36
3.7.1. Par $z_2$ - $z_1$ .....	36
3.7.2. Par $z_4$ - $z_3$ .....	41
3.7.3. Par $z_6$ - $z_5$ .....	43
3.8. Kontrolni proračun zupčanika.....	45
3.8.1. Sile na pojedinim zupčaničkim parovima.....	45
3.8.2. Kontrola zupčanika $z_2$ (para $z_2$ - $z_1$ ) u odnosu na dozvoljeno naprežanje u korijenu .....	46
3.8.3. Kontrola zupčanika $z_2$ (para $z_2$ - $z_1$ ) u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka.....	50
3.8.3.1. Kontrola u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka u pojedinim točkama zahvata .....	52
3.9. Proračun vratila .....	54
3.9.1. Proračun ležajnih mjesta .....	58

---

3.9.2. Opterećenje vratila momentima u pojedinim presjecima .....	60
3.9.3. Kontrola postojeće sigurnosti u pojedinim presjecima .....	65
3.10. Proračun i kontrola u odnosu na dozvoljenu temperaturu zagrijavanja .....	69
3.11. Izvadak iz proračuna .....	73
4. MODEL MULTIPLIKATORA.....	77
5. ZAKLJUČAK.....	95
LITERATURA.....	96
PRILOZI.....	98

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Konstrukcija vjetroatragata .....	1
Slika 2.	Ovisnost koeficijenta iskoristivosti $C_p$ o omjeru brzine vjetra i brzine vrha lopatice $\lambda$ .....	4
Slika 3.	Usporedba kaveznih motora iste nazivne snage .....	6
Slika 4.	Prikaz multiplikatora vjetroatragata .....	7
Slika 5.	Jednostupanjski planetarni prijenosnik s jednostupanjskim izlaznim multiplikatorom .....	8
Slika 6.	Kataloški izvadak za jednostupanjski planetarni prijenosnik s jednostupanjskim izlaznim multiplikatorom .....	8
Slika 7.	Anatomija multiplikatora vjetroatragata tvrtke <i>Liberty</i> .....	9
Slika 8.	Presjek kroz kućište vjetroatragata tvrtke <i>Liberty</i> .....	10
Slika 9.	Dvostupanjski planetarni zupčanik s diferencijalnim konstantno varijabilnim prijenosnim omjerom .....	11
Slika 10.	Shematski presjek kroz multiplikator vjetroatragata .....	12
Slika 11.	Ležaj tvrtke NKE .....	12
Slika 12.	Primjeri uležištenja planeta valjkastim ležajevima .....	13
Slika 13.	Uležištenja planeta uporabom samopodesivog valjnog ležaja .....	13
Slika 14.	Multiplikator vjetroatragata prema patentu US 7008348 B2 .....	14
Slika 15.	Multiplikator vjetroatragata sa siluetom čovjeka unutar kućišta vjetroatragata ..	14
Slika 16.	Dvoredni bačvasti ležaj .....	15
Slika 17.	Izvedbe ručice .....	15
Slika 18.	Izvedbe kovanih jednodjeljnih ručica .....	16
Slika 19.	Lijevana izvedba jednodjeljne ručice .....	16
Slika 20.	Presjek multiplikatora .....	17
Slika 21.	Multiplikator vjetroatragata izravno je povezan s vjetroturbinom .....	18
Slika 22.	Principijelne mogućnosti izjednačenja prijenosa opterećenja .....	19
Slika 23.	Najčešće korišteni uzdužni profili zuba spojke .....	19
Slika 24.	Karakteristika asinkronog stroja .....	20
Slika 25.	Vjetroatragat s multiplikatorom, asinkronim generatorom i turbinom promjenjive brzine vrtnje .....	21
Slika 26.	Tipična statička karakteristika snage vjetroturbine pri upravljanju promjenom napradnog kuta zakretom lopatica .....	21
Slika 27.	Brzina vrtnje vjetroturbine i asinkronog generatora .....	22
Slika 28.	Jednostavni planetarni prijenosnik tipa 2UV .....	22
Slika 29.	Orijentacija pri izboru kružne zračnosti dana u zavisnosti od modula i područja primjene .....	37
Slika 30.	Vrijednosti graničnih odstupanja razmaka osi $A_{a,g}$ i $A_{a,d}$ u ovisnosti o području nazivne mjere razmaka osi i kvalitete .....	38
Slika 31.	Vrijednosti graničnih odstupanja debljine zuba $A_w$ u ovisnosti o modulu i promjeru diobene kružnice za kvalitetu izrade zupčanika 9 .....	39
Slika 32.	Vrijednosti dozvoljenih odstupanja kod radialne kontrole sprežanjem ( $T''_i$ ) i dozvoljenog skoka ovog odstupanja ( $\Delta T''_i$ ) u ovisnosti o modulu, promjeru diobene kružnice i kvaliteti izrade zupčanika .....	40
Slika 33.	Faktor oblika $Y_F$ .....	46
Slika 34.	Značajka prekrivanja pojedinačnog zahvata $\varepsilon'_k$ ( $\alpha_w = \alpha_{tw}$ ) .....	47

Slika 35.	Pomoćni faktor raspodijele $q_L$ i faktori raspodijele opterećenja $K_{F\alpha}$ i $K_{H\alpha}$ .....	47
Slika 36.	Vrijednosti faktora unutrašnjih dinamičkih sila $K_V$ za čelnike s ravnim zubima za ISO kvalitetu ozubljenja 3 do 10.....	48
Slika 37.	Približne vrijednosti faktora $K_V$ za planetarne prijenosnike u zavisnosti od obodnih brzina i kvalitete ozubljenja prema DIN 3990 .....	49
Slika 38.	Potrebni koeficijenti sigurnosti ( $S_F$ i $S_H$ ) .....	49
Slika 39.	Faktor materijala $Z_M$ ( $Y_W$ ).....	50
Slika 40.	Faktor oblika boka $Z_H$ prema HRN M.C1.016.....	51
Slika 41.	Skica zupčanika $z_1$ i $z_2$ u zahvatu.....	52
Slika 42.	Shematski prikaz djelovanja sila na vratilo .....	54
Slika 43.	Presjeci na vratilu .....	55
Slika 44.	Faktor $\beta_{kf2}$ kod savijanja.....	61
Slika 45.	Faktor $\beta_{kt1,4}$ kod uvijanja.....	62
Slika 46.	Faktori zareznog djelovanja $\beta_{kf}$ i $\beta_{kt}$ kod savijanja i uvijanja vratila s utorom za perom.....	64
Slika 47.	Faktor veličine strojnog dijela $b_1$ kod savijanja i uvijanja .....	65
Slika 48.	Faktor kvalitete površinske obrade $b_2$ .....	66
Slika 49.	Sustav hlađenja i podmazivanja multiplikatora.....	71
Slika 50.	Dostava ulja kroz kućište multiplikatora.....	72
Slika 51.	Kataloški prikaz multiplikatora zajedno sa sustavom hlađenja i podmazivanja ...	72
Slika 52.	Prikaz multiplikatora u izometriji.....	77
Slika 53.	Nacrt sklopa multiplikatora .....	78
Slika 54.	Desni bokocrt multiplikatora.....	78
Slika 55.	Lijevi bokocrt multiplikatora.....	79
Slika 56.	Stražnji nacrt multiplikatora .....	79
Slika 57.	Tlocrt multiplikatora.....	80
Slika 58.	Donji tlocrt multiplikatora.....	80
Slika 59.	Presjek u nacrtu .....	81
Slika 60.	Detalj radijalno-aksijalnih ležajnih mjesta nosača planeta i vratila zupčanika $z_2$ .	81
Slika 61.	Detalj većeg planeta i radijalnih ležajnih mjesta nosača planeta i vratila zupčanika $z_2$ .....	82
Slika 62.	Detalj vratila većeg zupčanika zadnjeg stupnja $z_5$ .....	83
Slika 63.	Detalj cijevi ožičenja multiplikatora .....	83
Slika 64.	Presjek multiplikatora u tlocrtu .....	84
Slika 65.	Detalj ležajnih mjesta izlaznog vratila-zupčanika $z_6$ .....	85
Slika 66.	Presjek prstena u kućištu .....	85
Slika 67.	Detalj zupčaste spojke prstena s kućištem .....	86
Slika 68.	Presjek sunčanika i većeg vratila zadnjeg stupnja u kućištu .....	86
Slika 69.	Detalj zupčaste spojke sunčanika s većim vratilom zadnjeg stupnja .....	87
Slika 70.	Detalj spoja dvaju dijelova nosača planeta zaticima .....	87
Slika 71.	Detalj spoja dvaju dijelova nosača planeta vijcima.....	88
Slika 72.	Pogled na unutarnji nosač planeta s vidljivim vijcima i zaticima koji međusobno spajaju unutarnji i vanjski nosač planeta .....	88
Slika 73.	Vanjski nosač planeta u izometriji .....	89
Slika 74.	Vanjski nosač planeta u drugom pogledu.....	89
Slika 75.	Unutarnji nosač planeta u izometriji .....	90
Slika 76.	Unutarnji nosač planeta u drugom pogledu.....	90
Slika 77.	Unutarnji međupoklopac u izometriji.....	91
Slika 78.	Unutarnji međupoklopac u drugom pogledu.....	91
Slika 79.	Srednji dio kućišta .....	92

---

Slika 80.	Detalj presjeka srednjeg dijela kućišta .....	92
Slika 81.	Veće vratilo zadnjeg stupnja .....	93
Slika 82.	Sunčanik $z_4$ .....	93
Slika 83.	Presjek multiplikatora u tlocrtu, pogled u izometriji.....	94



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kinematska analiza 2UV planetarnog prijenosnika .....	24
Tablica 2. Prijenosni omjeri .....	73
Tablica 3. Brojevi zubi pojedinih elemenata prijenosnika .....	73
Tablica 4. Kutevi nagiba boka ( $\beta$ ) pojedinih zupčaničkih parova .....	74
Tablica 5. Normalni moduli ( $m_n$ ) pojedinih zupčaničkih parova .....	74
Tablica 6. Diobeni promjeri pojedinih elemenata prijenosnika (u čelnoj ravnini za zupčanike s kosim ozubljenjem).....	74
Tablica 7. Osni razmaci nakon pomaka profila.....	75
Tablica 8. Faktori pomaka profila .....	75
Tablica 9. Mjere preko nekoliko zubi .....	76
Tablica 10. Materijali zupčanika .....	76

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

CRTEŽ 1 Sklop multiplikatora

CRTEŽ 2 Sklop multiplikatora

CRTEŽ 3 Sklop multiplikatora

CRTEŽ 4 Prsten zupčanik z1

CRTEŽ 5 Manji planet z2

CRTEŽ 6 Srednji dio kućišta

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$\text{mm}^2$	Površina isijavanja
$A_{a,d}$	$\mu\text{m}$	Donje granično odstupanje razmaka osi
$A_{a,g}$	$\mu\text{m}$	Gornje granično odstupanje razmaka osi
$A_W$	$\mu\text{m}$	Granično odstupanje debljine zuba
$a$	$\text{mm}$	Osni razmak za nulti par zupčanika s ravnim zubima
$a_t$	$\text{mm}$	Osni razmak za nulti par u čelnoj (bočnoj) ravnini zupčanika s kosim zubima
$a_{tw}$	$\text{mm}$	Osni razmak nakon pomaka profila u čelnoj (bočnoj) ravnini zupčanika s kosim zubima
$a_w$	$\text{mm}$	Osni razmak nakon pomaka profila zupčanika s ravnim zubima
$b$	$\text{mm}$	Širina zupčanika
$b_1$	-	Faktor veličine strojnog dijela
$b_2$	-	Faktor kvalitete površinske obrade
$C$	N	Dinamička nosivost ležaja
$C_0$	N	Statička nosivost ležaja
$C_p$	-	Koeficijent iskoristivosti vjetroturbine
$c$	$\text{mm}$	Tjemena zračnost
$c_1$	-	Pomoćni faktor u utvrđivanju faktora zarezanog djelovanja kod savijanja vratila
$c_2$	-	Pomoćni faktor u utvrđivanju faktora zarezanog djelovanja kod uvijanja vratila
$d$	$\text{mm}$	Promjer vratila
$d$	$\text{mm}$	Diobeni promjer zupčanika s ravnim zubima
$d_a$	$\text{mm}$	Tjemeni promjer zupčanika s ravnim zubima
$d_b$	$\text{mm}$	Promjer temeljne kružnice zupčanika s ravnim zubima
$d_f$	$\text{mm}$	Podnožni promjer zupčanika s ravnim zubima
$d_t$	$\text{mm}$	Diobeni promjer zupčanika s kosim zubima
$d_{ta}$	$\text{mm}$	Tjemeni promjer zupčanika s kosim zubima
$d_{tb}$	$\text{mm}$	Promjer temeljne kružnice zupčanika s kosim zubima
$d_{tf}$	$\text{mm}$	Podnožni promjer zupčanika s kosim zubima
$d_{tw}$	$\text{mm}$	Kinematski promjer zupčanika s kosim zubima
$d_w$	$\text{mm}$	Kinematski promjer zupčanika s ravnim zubima
$F$	N	Sila
$F_{aruc}$	N	Aksijalna sila na ručici
$F_{rruc}$	N	Radijalna sila na ručici
$F_{wa}$	N	Aksijalna sila zupčaničkog para

$F_{wr}$	N	Radijalna sila zupčaničkog para
$F_{wt}$	N	Tangencijalna sila zupčaničkog para
$f$	Hz	Frekvencija izmjenične struje
$i$	-	Prijenosni omjer zupčaničkog para
$i_{uk}$	-	Ukupni prijenosni omjer
$j_{max}$	$\mu m$	Maksimalna kružna zračnost
$j_{min}$	$\mu m$	Minimalna kružna zračnost
$K_{F\alpha}$	-	Faktor raspodjele opterećenja kod naprezanja u korijenu zuba
$K_{F\gamma}$	-	Faktor nejednolike raspodjele opterećenja za planetarne prijenosnike kod naprezanja u korijenu zuba
$K_{H\alpha}$	-	Faktor raspodjele opterećenja kod Hertzovog naprezanja
$K_{H\gamma}$	-	Faktor nejednolike raspodjele opterećenja za planetarne prijenosnike kod Hertzovog naprezanja
$K_I$	-	Faktor udara
$K_V$	-	Faktor unutrašnjih dinamičkih sila
$k$	-	Uvjet broja zubi $k$ = cijeli broj
$L$	-	Trajnost ležaja u brojevima okretaja
$L_h$	h	Trajnost ležaja u radnim satima
$M$	Nmm	Moment koji opterećuje vratilo u pojedinom presjeku
$M_{red}$	Nmm	Reducirani moment
$m_n$	mm	Normalni modul ozubljenja
$N$	-	Minimalni broj planeta
$n$	o/min	Brzina vrtnje zupčanika ili vrtila
$n_N$	o/min	Nazivna brzina vrtnje vjetroturbine
$n_R$	o/min	Brzina vrtnje ručice
$n_s$	o/min	Sinkrona brzina vrtnje
$P$	W	Snaga
$P_{g,uk}$	W	Ukupno izgubljena snaga
$P'_{g,uk}$	%	Ukupni gubici izraženi postotkom
$P_{izl}$	W	Izlazna snaga iz vjetroturbine
$P_N$	W	Nazivna snaga
$p$	-	Broj pari polova
$p_e$	mm	Osnovni korak profila
$Q_u$	l/min	Potrebna količina rashladnog ulja
$q_L$	-	Pomoćni korektivni faktor raspodjele
$S_F$	-	Faktor sigurnosti loma zuba
$S_H$	-	Faktor sigurnosti ljuštenja bokova
$S_{post}$	-	Postojeći faktor sigurnosti
$S_{potr}$	-	Potreban faktor sigurnosti
$R$	m	Polumjer lopatica vjetroturbine
$R_{tur}$	m	Polumjer lopatica vjetroturbine

$T$	Nm	Moment uvijanj (torzije)
$T_g$	-	Najveći zajednički nazivnik broja zubi planeta
$T_{izl,max}$	Nm	Maksimalni moment na izlazu
$T_{max}$	Nm	Maksimalni moment
$T_{max,g}$	Nm	Maksimalni moment s uključenim gubicima
$T_R$	Nm	Moment na ručici
$T''_i$	$\mu m$	Dozvoljeno odstupanje kod radijalne kontrole sprezanjem
$t_u$	$^{\circ}C$	Temperatura ulja
$t_z$	$^{\circ}C$	Temperatura zraka
$u$	-	Omjer zubi zupčanika u zupčaničkom paru
$V_{min}$	l	Minimalna zapremina ulja u spremniku za ulje
$v$	m/s	Brzina vjetra
$v_{vrh}$	m/s	Brzina vrha lopatice
$W$	mm	Nazivna mjera preko nekoliko zubi
$x$	-	Faktor pomaka profila
$Y_F$	-	Faktor oblika
$Y_{\epsilon}$	-	Faktor učešća opterećenja
$Z_B$	-	Faktor zahvata u točki zahvata B
$Z_D$	-	Faktor zahvata u točki zahvata D
$Z_H$	-	Faktor oblika boka
$Z_M$	$\sqrt{N/mm^2}$	Faktor materijala
$z$	-	Broj zubi zupčanika
$z_{gr}$	-	Praktična vrijednost graničnog broja zubi
$z_w$	-	Mjerni broj zubi nazivne izmjere zupčanika
$\Delta i$	%	Razlika prijenosnih omjera
$\Delta T$	Nm	Razlika momenata
$\Delta T'$	%	Razlika momenata izražena postotkom
$\Delta T''_i$	$\mu m$	Dozvoljeni skok odstupanja kod radijalne kontrole sprezanjem
$\Delta t$	$^{\circ}C$	Razlika između izlazne i ulazne temperature ulja za ulje koje se hladi u spremniku
$\Phi$	kJ/h	Ukupno proizvedena toplina
$\Phi_{odv}$	kJ/h	Toplina odvedena prirodnim hlađenjem
$\alpha_0$	-	Faktor čvrstoće materijala vratila obzirom na način njegovog opterećenja odnosno naprezanja
$\alpha_n$	$^{\circ}$	Normalni kut zahvatne linije prije pomaka profila
$\alpha_n$	rad	Normalni kut zahvatne linije prije pomaka profila
$\alpha_{nw}$	$^{\circ}$	Normalni kut zahvatne linije nakon pomaka profila
$\alpha_{nw}$	rad	Normalni kut zahvatne linije nakon pomaka profila
$\alpha_s$	kJ/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline kod isijavanja
$\alpha_t$	$^{\circ}$	Čeoni kut zahvatne linije prije pomaka profila
$\alpha_t$	rad	Čelni (bočni) kut zahvatne linije prije pomaka profila

$\alpha_{tw}$	°	Čelni (bočni) kut zahvatne linije nakon pomaka profila
$\alpha_{tw}$	rad	Čelni (bočni) kut zahvatne linije nakon pomaka profila
$\beta$	°	Kut nagiba boka
$\beta$	rad	Kut nagiba boka
$\beta_b$	°	Kut nagiba boka na temeljnoj kružnici
$\beta_b$	rad	Kut nagiba boka na temeljnoj kružnici
$\beta_{kf}$	-	Faktor zareznog djelovanja kod savijanja vratila s utorom za pero
$\beta_{kf}$	-	Faktor zareznog djelovanja kod savijanja vratila za odnose $D/d \neq 2,0$
$\beta_{kf2}$	-	Faktor zareznog djelovanja kod savijanja vratila za odnose $D/d = 2,0$
$\beta_{kt}$	-	Faktor zareznog djelovanja kod uvijanja vratila s utorom za pero
$\beta_{kt}$	-	Faktor zareznog djelovanja kod uvijanja vratila za odnose $D/d \neq 1,4$
$\beta_{kt1,4}$	-	Faktor zareznog djelovanja kod uvijanja vratila za odnose $D/d = 1,4$
$\gamma$	N/dm <sup>3</sup>	Specifična težina ulja
$\delta_{min}$	°	Minimalni ugradbeni kut
$\varepsilon'_k$	-	Značajka prekrivanja pojedinačnog zahvata
$\eta$	-	Koeficijent iskoristivosti elektromotora
$\lambda$	-	Omjer brzine vjetra i brzine vrha lopatice
$\lambda$	-	Faktor širine zuba
$\pi$	-	Arhimedova konstanta
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća zraka
$\rho_{B,C,D}$	mm	Lokalni radijusi zaobljenja bokova
$\sigma_F$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje u korijenu zuba
$\sigma_{Flim}$	N/mm <sup>2</sup>	Dinamička izdržljivost na naprezanje u korijenu zuba
$\sigma_{FP}$	N/mm <sup>2</sup>	Dopušteno naprezanje u korijenu zuba
$\sigma_f$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje vratila na savijanje
$\sigma_{fDN}$	N/mm <sup>2</sup>	Trajna dinamička čvrstoća (dinamička izdržljivost) vratila na savijanje
$\sigma_{HB}$	N/mm <sup>2</sup>	Hertzovo naprezanje u točki zahvata B
$\sigma_{HD}$	N/mm <sup>2</sup>	Hertzovo naprezanje u točki zahvata D
$\sigma_{Hlim}$	N/mm <sup>2</sup>	Izdržljivost na Hertzovo naprezanje
$\sigma_{HP}$	N/mm <sup>2</sup>	Dopušteno Hertzovo naprezanje
$\varphi$	-	Faktor udara
$\omega$	rad/s	Kutna brzina
$\omega_N$	rad/s	Nazivna kutna brzina vjetroturbine
$\omega_{tur}$	rad/s	Kutna brzina vjetroturbine

## SAŽETAK

Multiplikator vjetroatregata u današnje vrijeme je bitan i neizostavan dio konstrukcije vjetroatregata koji služi za povezivanje i prilagodbu brzine vrtnje sporohodnog vratila vjetroturbine s brzohodnim vratilom generatora. U ovom radu su opisana neka postojeća konstrukcijska rješenja multiplikatora vjetroatregata, dan je prikaz načina rada multiplikatora i njegova uloga u sustavu vjetroatregata, te detalji izvedbi konstrukcijskih rješenja pojedinih dijelova. Razrađeno je jedno odabrano konstrukcijsko rješenje, napravljena je kinematska analiza prijenosnika i podjela prijenosnih omjera. Napravljen je dio proračuna čvrstoće uzimajući u obzir poznate podatke te je na osnovu rezultata proračuna izrađen 3D model svih dijelova multiplikatora i sklopa multiplikatora u programskom paketu SolidWorks. Od tehničke dokumentacije napravljeno je šest reprezentativnih crteža: tri sklopna, jedan dio kućišta, jedno vratilo i jedan zupčanik. Daljnjom razradom mogla bi se napraviti kompletna tehnička dokumentacija potrebna za proizvodnju.

Ključne riječi: multiplikator, vjetroatregat, vjetroturbina, zupčanik, planetarni prijenosnik, vratilo, asinkroni generator, konstrukcija, snaga, ležaj

## **SUMMARY**

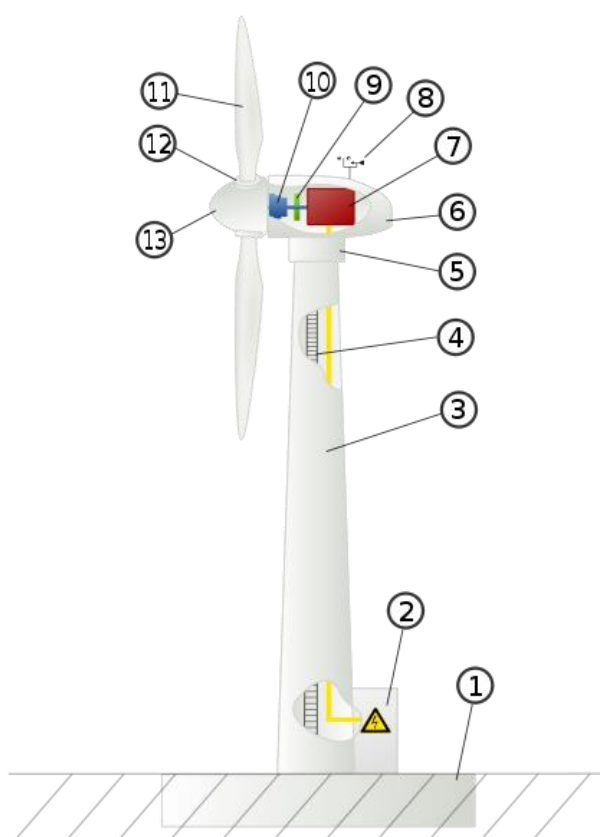
At present time wind turbine multiplier is an essential and indispensable element of the wind turbine design and is used to connect and adapt rotational speed of low-speed wind turbine shaft to the high-speed shaft of the wind turbine generator. This thesis describes some existing design solutions of wind turbine multipliers. A review of multiplier way of work was given, its role in the system of wind turbine and details of design solutions of specific parts. One selected design solution was elaborated, kinematic analysis of gears and division of gear ratios was made. Part of strength calculation was made taking into account known data and based on the results of calculation 3D model of all parts of the multiplier and assembly of the multiplier has been made. Model has been created in software package SolidWorks. Six representative drawings of technical documentation were made: three assembly drawings, one part of the housing, one shaft and one gear. With further elaboration complete technical documentation necessary for production could be done.

Key words: multiplier, wind turbine, gear, planetary gearbox, shaft, asynchronous generator, design, power, bearing



## 1. UVOD

Multiplikator vjetroagregata je važan modul cijelog agregata koji povezuje vjetroturbinu sa generatorom. Vjetroagregat je strojno postrojenje koje pretvara kinetičku energiju vjetra najprije u mehaničku energiju, a potom u električnu energiju pogodnu za slanje u električnu mrežu. Osnovni dijelovi svakog vjetroagregata su vjetroturbina, multiplikator vjetroagregata, električni generator, kućište vjetroagregata, nosivi stup, veza na električnu mrežu i temelj. Bitno je razlikovati pojmove vjetroturbina, vjetroagregat i vjetroelektrana. Vjetroturbina je samo dio vjetroagregata koji se sastoji od lopatica i osovine koja se dalje nastavlja do multiplikatora. Vjetroturbina pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju. Vjetroagregat je cijelo postrojenje koje energiju vjetra pretvara u energiju pogodnu za prijenos u električnu mrežu, dok je vjetroelektrana više vjetroagregata na jednom području. Vjetroelektrana se još često naziva i vjetropark ili vjetrofarma.



Slika 1. Konstrukcija vjetroagregata [1]

Na slici 1 je prikazana konstrukcija tipičnog vjetroagregata sa horizontalnom osi vrtnje. Brojevima 1 – 13 označeni su dijelovi vjetroagregata i to ovim slijedom:

1. Temelj
2. Veza na električnu mrežu
3. Nosivi stup
4. Ljestve za pristup dijelovima u kućištu vjetroagregata
5. Regulacija usmjerenja vjetroturbine (Yaw Control)
6. Kućište vjetroagregata
7. Električni generator
8. Anemometar, uređaj za mjerenje brzine i smjera vjetra
9. Električna ili mehanička kočnica
10. Multiplikator
11. Lopatica rotora
12. Regulacija napadnog kuta lopatice (Pitch Control)
13. Kućište vjetroturbine

Vjetroagregati manjih snaga uopće nemaju multiplikator, nego je osovinu vjetroturbine izravno povezana na električni generator, bez prilagođavanja brzine vrtnje. Izvedbe bez multiplikatora su sve češće i kod većih vjetroagregata gdje se koriste električni generatori s mnogo pari polova. U vjetroagregatima se za proizvodnju električne energije koriste asinkroni generatori, da bi se dobila izmjenična struja na frekvenciji mreže generator bi se trebao okretati sinkronom brzinom vrtnje, a iznos sinkrone brzine generatora ovisi o broju pari polova generatora i traženoj frekvenciji proizvedene struje [2].

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Gdje  $n_s$  predstavlja sinkronu brzinu vrtnje u o/min,  $f$  frekvenciju izmjenične struje, koja za europsku mrežu iznosi 50 Hz, a za sjeveroameričku 60 Hz,  $p$  predstavlja broj pari polova. Iz izraza (1) stoga slijedi da klasični četveropolni generator uz brzinu vrtnje od 1500 o/min i brzinu vrtnje lopatica od 20 o/min zahtijeva prijenosni omjer 75, dok u slučaju generatora s 200 polova i brzinom vrtnje 30 o/min nije potreban nikakav prijenosni omjer ukoliko je brzina vrtnje lopatica također 30 o/min.

Osim prilagođavanja brzine vrtnje električnom generatoru, multiplikator ima i ulogu smanjenja momenta od vratila vjetroturbine do vratila generatora. Naime, prema instaliranoj snazi vjetroagregati se mogu podijeliti na:

- Male, sa instaliranom snagom do 100 kW
- Srednje, sa instaliranom snagom 100 kW – 1,5 MW
- Velike, sa instaliranom snagom većom od 1,5 MW

Dakle, kod velikih vjetroagregata javljaju se ogromni momenti na vratilu vjetroturbine budući su brzine vrtnje vjetroturbina male i kreću se u rasponu od 5 do 30 o/min. Velike snage i male brzine vrtnje znače velike momente, tako na primjer za vjetroagregat instalirane snage 2 MW i brzinu vrtnje 20 o/min dobije se moment na vratilu vjetroturbine:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot n} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 60}{2\pi \cdot 20} = 954\,929,7 \text{ Nm} \quad (2)$$

Tako da kod velikih vjetroagregata multiplikator ima bitnu ulogu smanjenja tog ogromnog opterećenja (momenta od oko milijun Nm) na vratilo generatora.

Unutar samog vjetroagregata postoje najmanje dvije regulacije. Prva je regulacija usmjerenja vjetroturbine (Yaw Control). Anemometrom se mjeri brzina vjetra i utvrđuje smjer puhanja vjetra, a vjetroturbina se zakreće tako da lopatice budu okrenute tako da vjetar struji izravno u njih. Također, kod velikih brzina vjetra se koči vjetroturbina zbog opasnosti da takvi udari vjetra uzrokuju štete na vjetroagregatu. Brzinu vjetra na kojoj se koči vjetroturbina utvrđuje proizvođač vjetroagregata.

Druga regulacija unutar vjetroagregata je regulacija napadnog kuta lopatice (Pitch Control), napadni kut lopatice se mijenja zakretanjem lopatica oko svoje osi. Naime, vjetroturbina nikako ne može preuzeti svu kinetičku energiju vjetra jer dio energije mora ostati u vjetru kako bi se on nakon što prođe kroz lopatice mogao dalje kretati i time omogućiti dolazak nove struje zraka. Maksimalno dostiziva teoretska granica iskoristivosti kinetičke energije vjetra iznosi 16/27 odnosno 59,3% i naziva se Betzova granica. To je teoretski stupanj iskoristivosti u idealiziranom slučaju i u praksi se može dosegnuti maksimalno 80% tog teoretskog iznosa. Utvrđeno je da stupanj iskoristivosti ovisi o omjeru brzine vjetra i brzine vrtnje vjetroturbine, odnosno da taj omjer bude bezdimenzijski izražava se kao omjer brzine vjetra i brzine vrha lopatica, a brzina vrha lopatica je u izravnoj geometrijskoj vezi sa brzinom vrtnje vjetroturbine:

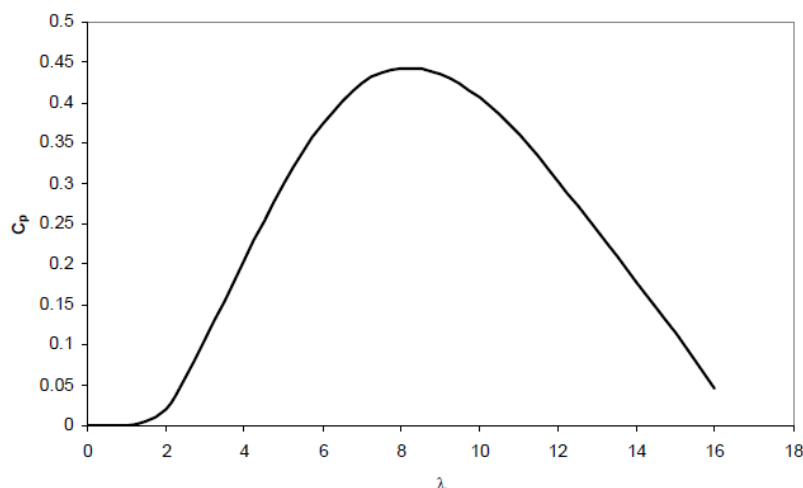
$$v_{\text{vrh}} = \omega_{\text{tur}} \cdot R_{\text{tur}} \quad (3)$$

Gdje  $v_{\text{vrh}}$  predstavlja brzinu vrha lopatica,  $\omega_{\text{tur}}$  kutna brzinu vjetroturbine, a  $R_{\text{tur}}$  polumjer lopatica vjetroturbine.

Izraz za dobivenu snagu iz vjetroturbine glasi:

$$P_{\text{izl}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p \quad (4)$$

Gdje  $\rho$  predstavlja gustoću zraka,  $R$  polumjer lopatica,  $v$  brzinu vjetra, a  $C_p$  koeficijent iskoristivosti. Na slici 2 je prikazana ovisnost koeficijenta iskoristivosti  $C_p$  o omjeru brzine vjetra i brzine vrha lopatice  $\lambda = v/v_{vrh}$ .



**Slika 2. Ovisnost koeficijenta iskoristivosti  $C_p$  o omjeru brzine vjetra i brzine vrha lopatice  $\lambda$  [3]**

Regulacijom napadnog kuta zakretanjem lopatica vjetroturbine oko njihove vlastite osi osigurava se konstantan omjer brzina vrtnje pri kojem se postiže maksimalna iskoristivost. Dakle, brzina vrtnje vjetroturbine se mijenja ovisno o brzini vjetra. To znači da ukoliko između vjetroturbine i generatora postoji konstantan prijenosni omjer brzina vrtnje generatora neće biti konstantna nego će se mijenjati kako se mijenja brzina vrtnje vjetroturbine.

Prema načinu pretvorbe energije vjetra u električnu te njihovom priključku na električnu mrežu vjetroagregati se mogu podijeliti na vjetroagregate s asinkronim generatorom i multiplikatorom i na vjetroagregate sa sinkronim generatorom, s ili bez multiplikatora [4], pa postoje:

- Asinkroni kavezni jedno ili dvobrzinski generator, s multiplikatorom
- Asinkroni klizno-kolutni dvostrano napajani generator, s multiplikatorom
- Sinkroni generator sa uzбудnom strujom na rotoru, direktni pogon
- Sinkroni generator sa uzбудnom strujom na rotoru, s multiplikatorom
- Sinkroni generator s trajnim magnetima, direktni pogon
- Sinkroni generator s trajnim magnetima, s multiplikatorom

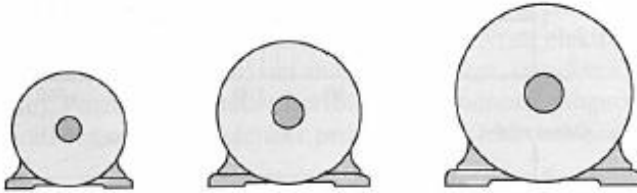
U vjetroagregatima kod kojih se koriste asinkroni generatori njihova sinkrona brzina vrtnje daje izmjeničnu struju frekvencije mreže (50 Hz). Kako se brzina vrtnje generatora mijenja ovisno o brzini vjetra, generator će se rijetko vrtjeti sinkronom brzinom vrtnje, što znači da će u većini slučajeva davati struju frekvencije različite od frekvencije mreže. Zbog toga kao dio veze na električnu mrežu mora biti postavljen ispravljač frekvencije koji najprije izmjeničnu struju koju proizvodi generator pretvara u istosmjernu, a potom tu istosmjernu pretvara u izmjeničnu struju na frekvenciji mreže.

### **1.1. Konstruktivne izvedbe multiplikatora vjetroagregata**

Kod velikih vjetroagregata, dakle onih sa instaliranom snagom većom od 1,5 MW, za multiplikator se u većini slučajeva koriste planetarni prijenosnici. Multiplikator vjetroagregata napravljen od planetarnih prijenosnika može se sastojati od samo jednog planetarnog prijenosnika, ili od dva planetarna prijenosnika spojena u seriju. Planetarni prijenosnici se koriste zbog njihovog dobrog svojstva da prenose velike snage, a zauzimaju relativno mali prostor, dakle prenose velike gustoće snaga, kao i mogućnosti ostvarivanja velikih prijenosnih omjera, a da pri tom zauzimaju relativno mali prostor. Nadalje, planetarni prijenosnici mogu činiti redukciju, odnosno multiplikaciju u istoj osi, odnosno izlazno vratilo prijenosnika se nalazi u istoj osi kao i ulazno vratilo, zbog toga planetarni prijenosnici dodatno štede prostor. Planetarni prijenosnici se u multiplikatorima vjetroagregata koriste zbog još jedne svoje prednosti, a to je visoki stupanj iskoristivosti jer se kod planetarnih prijenosnika samo dio snage prenosi valjanjem, a ostali dio spojnički [5].

U novije vrijeme je tendencija da se multiplikatori potpuno izbace iz vjetroagregata jer njihovo stavljanje poskupljuje izvedbu i povećava masu vjetroagregata. Ipak, može ih se izbaciti jedino uvođenjem generatora sa 100 pari polova, a takvi su generatori skuplji od uobičajenih generatora sa 2 ili 3 para pola. Drugi je problem taj što je masa generatora proporcionalna iznosu momenta koji se javlja na rotoru, stoga je masa vjetrogeneratora koji se priključuju izravno na vratilo vjetroturbine znatno veća od mase onih generatora koji su s vratilom vjetroturbine povezani preko multiplikatora [6]. Multiplikator ima određeni stupanj korisnosti koji smanjuje ukupnu iskoristivost pretvorbe kinetičke energije vjetra u električnu energiju, međutim ugradnjom multiplikatora i uvođenjem dodatne regulacije može se omogućiti da generator proizvodi struju na frekvenciji mreže i na taj način izbjeći gubitke energije koji nastaju usljed ispravljanja frekvencije. Stoga se multiplikatori i dalje ugrađuju i u novije izvedbe vjetroagregata. Hoće li vjetroagregat raditi bez multiplikatora ili s njim i s kakvim će multiplikatorom vjetroagregat raditi ovisi isključivo o odluci proizvođača vjetroagregata.

Na slici 3 ([2], str. 452) uspoređuju se tri motora iste nazivne snage, ovaj primjer je primjenjiv i u slučaju generatora. Podaci za snagu  $P$ , brzinu vrtnje  $n$ , masu  $m$  i korisnost  $\eta$  potječu iz kataloga proizvođača *Končar* za trofazne kavezne motore zatvorene izvedbe (IP 54) s oznakom 6AZ. Moment vrtnje  $M$  izračunat je pomoću nazivne snage i nazivne brzine vrtnje, a cijena potječe od proizvođača. Uspoređuju se relativne cijene prema najjeftinijem motoru. Kako motori imaju jednake nazivne snage, ali različite brzine vrtnje, razlikuju se nazivni momenti. Motor s većom brzinom vrtnje manji je, lakši, jeftiniji i ima bolji faktor snage za istu nazivnu snagu od motora s nižom brzinom vrtnje. U stacionarnom je pogonu važna snaga kojom se motor odnosno generator može trajno opteretiti, sva tri motora sa slike 3 mogu zadovoljiti potrebe statičkog pogona koji traži određenu snagu. Ako se brzina slobodno mijenja (što nije čest slučaj, ali je slučaj kod vjetroagregata), treba uzeti u obzir brzohodni motor odnosno generator jer je ekonomičniji od sporohodnog. [2]



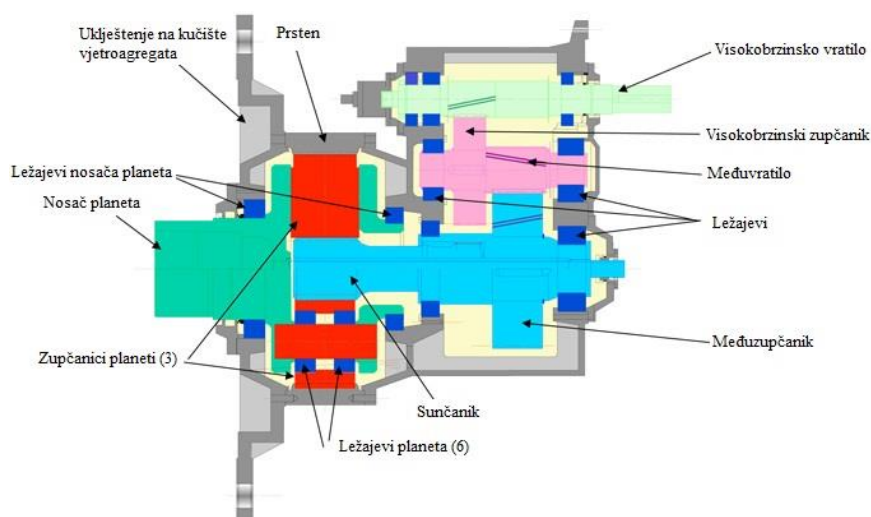
<i>snaga</i>	55 kW	55 kW	55 kW
<i>brzina vrtnje</i>	1480 min <sup>-1</sup>	985 min <sup>-1</sup>	740 min <sup>-1</sup>
<i>moment</i>	355 Nm	533 Nm	710 Nm
<i>masa</i>	415 kg	550 kg	725 kg
<i>relativna cijena</i>	1,0	1,25	1,90
$\eta$	0,94	0,94	0,93

**Slika 3. Usporedba kaveznih motora iste nazivne snage [2]**

Kad je moguće, treba odabrati motor, odnosno generator, nazivne brzine vrtnje jednake brzini pogona. Tada je moguć izravni spoj motora, odnosno generatora, i radnog mehanizma i nije potrebno prijenosom mijenjati brzinu vrtnje. Često se kod sporohodnih pogona namijenjenih stacionarnom radu isplati ekonomska analiza koja će usporediti brzohodni jeftiniji motor s mehaničkim ili električnim uređajem za smanjenje brzine vrtnje i sporohodni skuplji motor bez dodatnih uređaja. Kod pogona s dinamičkim ili pretežno dinamičkim radom i izravnim priključkom na mrežu prikladniji je teži, veći i skuplji sporohodni motor, odnosno generator, koji je zbog gubitaka u prijelaznim stanjima u prednosti pred brzohodnim. Za motore, odnosno generatore, koji se na mrežu priključuju pomoću pretvarača napona i/ili frekvencije gubisi u prijelaznim stanjima mogu se optimirati, pa se povoljan izbor nalazi među brzohodnim motorima, odnosno generatorima. Za određeni pogon potrebno je uzeti u obzir tehničke zahtjeve i moguća rješenja pogona, koja mogu biti vrlo raznolika, te na temelju ekonomske analize odrediti najpovoljniju nazivnu brzinu vrtnje motora. [2]

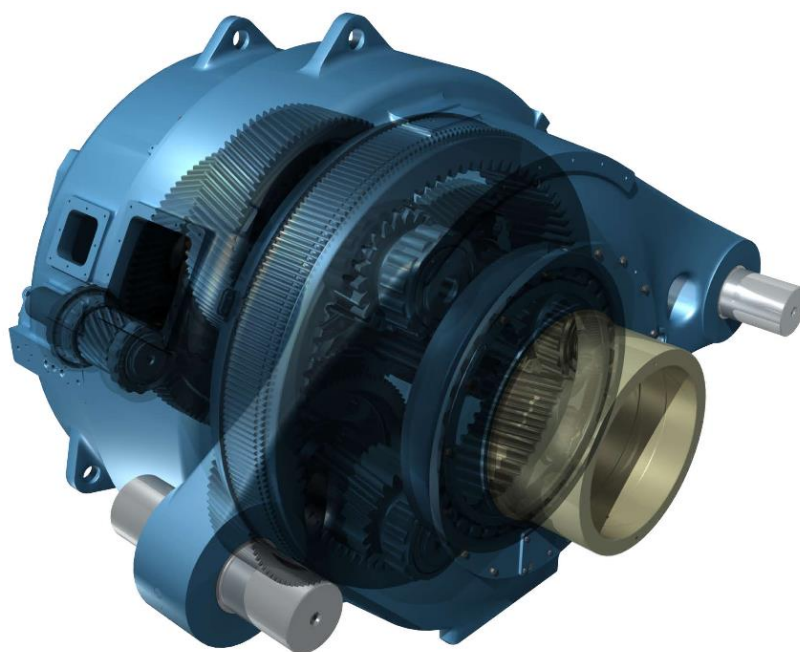
U velikim vjetroagregatima javljaju se velika opterećenja (veliki momenti) iz već navedenih razloga (velike snage, male brzine vrtnje), stoga multiplikator vjetroagregata ima zadatak upravo prenošenja velikih snaga, odnosno smanjenja momenta sa iznosa koji se javlja na vratilu vjetroturbine (oko milijun Nm), na iznos prikladan za opterećivanje vratila generatora. Multiplikator vjetroagregata također ima zadaću ostvarivanja velikih prijenosnih omjera koji će brzinu vrtnje sporohodnog vratila vjetroturbine prilagoditi brzini vrtnje brzohodnog vratila generatora. Također, bilo bi poželjno, da multiplikator ima što je moguće manju masu i zauzima što manji volumen, a da pritom ispuni zahtjeve za prenošenjem velikih snaga i ostvarivanjem velikih prijenosnih omjera. Zahtjevi za malom masom i volumenom su posebno bitni jer se multiplikator vjetroagregata ugrađuje u kućište do kojeg se mora doprijeti dizalicom. Planetarni prijenosnici ispunjavaju sve navedene uvijete te se stoga najčešće koriste kao multiplikatori vjetroagregata.

Multiplikatori vjetroagregata se uglavnom rade tako da imaju konstantan prijenosni omjer. Prikaz jednog takvog multiplikatora dan je na slici 4 sa koje se jasno može opisati i princip rada multiplikatora, odnosno tok prijenosa snage (momenta). Snaga se dovodi sa osovine vjetroturbine na nosač planeta (označen zelenom bojom na slici 4), nosač planeta je uležišten u kućištu vjetroagregata te on svojom rotacijom rotira planete planetarnog prijenosnika (označene crvenom bojom na slici 4). Prsten planetarnog prijenosnika je uklješten za kućište kako je prikazano, dok se sunčanik rotira manjom brzinom, uklještenjem prstena planetarni prijenosnik postaje običan multiplikator s konstantnim prijenosnim omjerom. Dalje se brzina vrtnje sunčanika dodatno multiplicira dvostupanjskim multiplikatorom s kosim zubima do konačne brzine vrtnje visokobrzinskog vratila koje je povezano s generatorom.



**Slika 4. Prikaz multiplikatora vjetroagregata [7]**

Takva konstruktivna izvedba multiplikatora vjetroagregata ima visokobrzinsko vratilo postavljeno paralelno s osi vjetroturbine ali odmaknuto od nje. Moguće su varijacije u izvedbi na način da postoji samo jedan planetarni prijenosnik ili dva spojena u seriju i da multiplikator na izlazu bude jednostupanjski ili dvostupanjski, moguće su izvedbe s kosim i s ravnim zubima. Praktični primjer jedne takve izvedbe izvučen iz kataloga tvrtke *General Electrics Drivetrain Technologies* prikazan je na slici 5, dok su kataloški podatci koje GE daje za taj multiplikator dani na slici 6.



**Slika 5. Jednostupanjski planetarni prijenosnik s jednostupanjskim izlaznim multiplikatorom [8]**

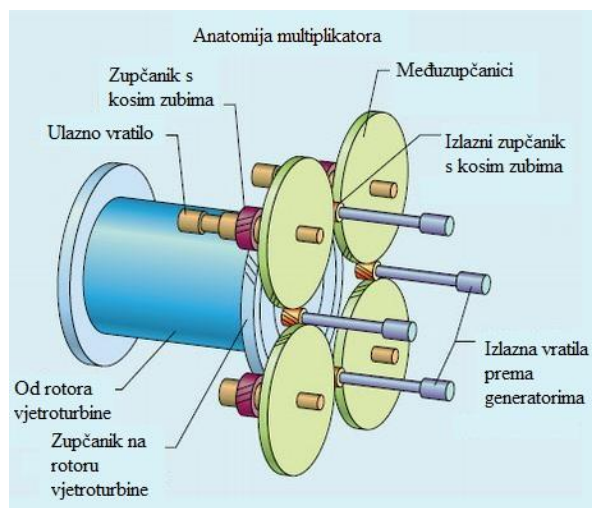
Snaga:	1.4 - 1.8 MW pri 16 - 20 o/min ulazne brzine vrtnje
Ulazni Moment:	700 - 970 kNm
Prijenosni omjer:	59:1 - 86:1
Izlazno vratilo tip/lokacija:	Horizontalno izlazno vratilo (vertikalno izlazno vratilo moguće od 2009. godine) locirano 550 mm od centralne osi
Aproksimirana masa:	14 969 kg (33 000 lbs)
Ukupna duljina:	2200 mm

**Slika 6. Kataloški izvadak za jednostupanjski planetarni prijenosnik s jednostupanjskim izlaznim multiplikatorom [8]**



Na slici 5 može se primjetiti da se za ležajeve sunčanika i izlaznog vratila koriste jednoredni valjkasti ležajevi. Isto tako može se primjetiti da je prsten planetarnog prijenosnika uklješten za kućište preko malih nazubljenja na vanjskoj strani prstena koja se ulažu u ista takva nazubljenja na unutarnjoj strani kućišta multiplikatora.

Kalifornijska tvrtka *Liberty* napravila je izvedbu multiplikatora samo sa vanjskim ozubljenjem, bez planetarnih prijenosnika. Anatomija te izvedbe prikazana je na slici 7, dakle, multiplikator ima četiri izlaza kako se može bolje vidjeti u presjeku kućišta na slici 8. Osnovni cilj je bio napraviti vjetroagregat koji će moći proizvoditi električnu energiju i u slučaju da jedan od generatora zakaže, u tom slučaju ostali generatori na sebe preuzimaju proizvodnju energije. Osim toga svaki od četiri generatora koji se montira na taj multiplikator je znatno manje mase od generatora koji bi na sebe preuzimao sam svu proizvodnju energije, tako da je montaža olakšana, a i uštedi se prostor kućišta vjetroagregata koje se može skratiti jer su četiri manja generatora manje duljine od jednog velikog.



**Slika 7. Anatomija multiplikatora vjetroagregata tvrtke *Liberty* [9]**



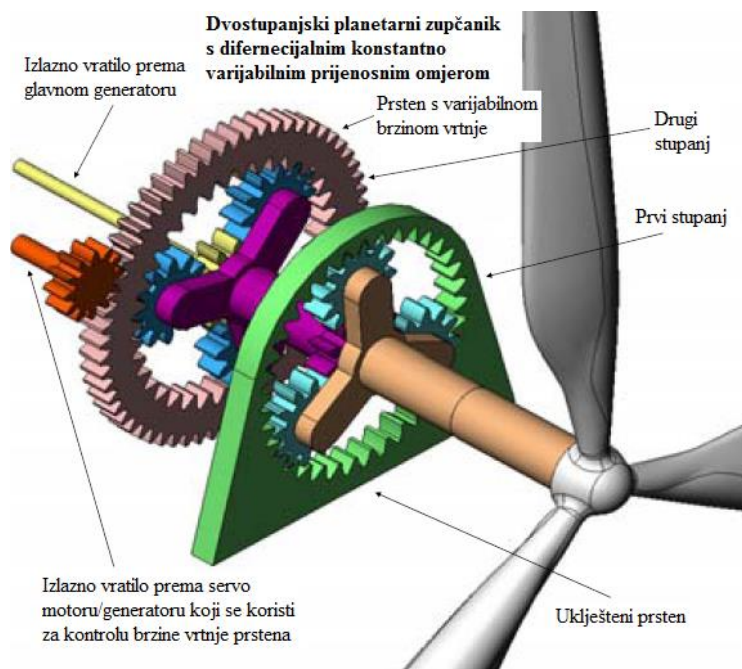
**Slika 8. Presjek kroz kućište vjetroagregata tvrtke Liberty [9]**

Cilj svakog postrojenja koje proizvodi električnu energiju je da ima što je moguće veću iskoristivost. Kod vjetroagregata maksimalna iskoristivost energije vjetra je limitirana *Betzovom granicom*. Osim toga, ukupna energija se troši i na različite mehaničke gubitke kroz multiplikator (zagrijavanje, bućkanje ulja...). Nadalje, dodatni gubici se pojavljuju prilikom ispravljanja frekvencije, odnosno dvostruke pretvorbe frekvencije struje od izmjenične koju proizvodi generator u istosmjernu, a potom te istosmjerne u izmjeničnu na frekvenciji mreže. U tom procesu pretvorbe frekvencije gubi se 5 – 10 % ukupne proizvedene energije [10]. Taj gubitak kod malih i srednjih vjetroagregata nije posebno značajan, ali kod velikih vjetroagregata takav gubitak bi bilo poželjno izbjeći.

Još jedna od dobrih osobina planetarnih prijenosnika je ta da mogu kočenjem jednog od tri člana (sunčanik, prsten, nosač planeta) mijenjati prijenosni omjer. Zbog tog svojstva se planetarni prijenosnici koriste u mjenjačkim kutijama vozila s automatskom transmisijom, jer su relativno jednostavno upravljivi i relativno jednostavno mijenjaju prijenosne omjere. Jedan od tri člana planetarnog prijenosnika se ne mora kočiti nego se također može kretati određenom brzinom i njegova vrtnja može mijenjati smjer. Upravo utjecanjem na brzinu i smjer vrtnje jednog od članova planetarnog prijenosnika (konkretno prstena) diferencijalni konstantno varijabilni prijenosnik stvara takav prijenosni omjer koji neovisno o ulaznoj brzini daje konstantno istu izlaznu brzinu vrtnje.

Slika 9 prikazuje diferencijalni konstantno varijabilni prijenosnik (eng. Differential Continuously Variable Transmission – DCVT). Na slici je prikazana shema iz koje se vidi princip rada takvog multiplikatora. Ulazno vratilo u prijenosnik je spojeno s vjetroturbinom i okreće se brzinom vrtnje vjetroturbine, to ulazno vratilo je povezano na ručicu prvog

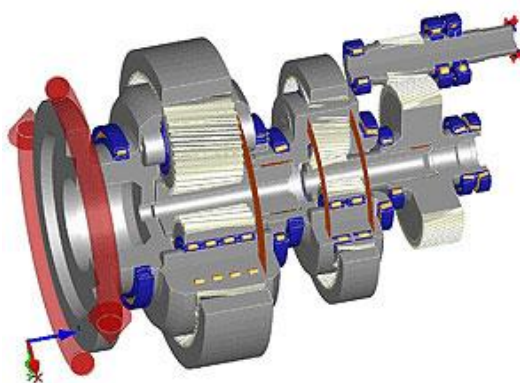
planetarnog prijenosnika, dok je prsten prvog planetarija uklješten za kućište multiplikatora, na takav način nastaje konstantan prijenosni omjer unutar prvog planetarnog prijenosnika između planeta nošenih ručicom i sunčanika. Sunčanik prvog planetarija, koji se dakle okreće brzinom vrtnje većom od brzine vrtnje vjetroturbine za prijenosni omjer prvog planetarija, dalje je povezan na ručicu planetarnog prijenosnika u drugom stupnju. U drugom stupnju prsten je s vanjske strane povezan sa servo-motorom koji regulira brzinu vrtnje prstena tako da se generator vrti konstantnom brzinom, iako dolazi do promjene brzine vrtnje vjetroturbine usljed promjene brzine vjetra. Snaga koja napaja servo-motor dolazi iz glavnog generatora i troši 0,7 % snage generatora [10], također, pri visokim brzinama vjetra servo-motoru je dozvoljena rotacija u suprotnom smjeru, tako da tada radi kao generator koji također proizvodi električnu energiju i na taj način dodatno doprinosi ukupnoj energetskej efikasnosti vjetroagregata [10]. Na slici 9 prikazana je jedna jednostavna izvedba diferencijalnog konstantno varijabilnog multiplikatora vjetroagregata, postoje i druge. Takvi su multiplikatori trenutno još samo stvar znanstvenih radova i istraživanja na temu povećanja iskoristivosti postrojenja vjetroagregata. Danas, u praktičnoj primjeni još se ne primjenjuju takvi multiplikatori, ali može se očekivati da bi se u budućnosti mogla uvesti diferencijalna konstantno varijabilna transmisija u multiplikatore vjetroagregata. Do uvođenja takve vrste prijenosa doći će kada se znanstvenim istraživanjima usavrši takva transmisija te kada će biti isplativo uložiti u tu dodatnu regulaciju na početku investicije radi bolje isplativosti cijelog postrojenja (vjetroagregata).



**Slika 9. Dvostupanjski planetarni zupčanic s diferencijalnim konstantno varijabilnim prijenosnim omjerom [10]**

## 1.2. Uležištenja, ručice i kućište multiplikatora vjetroagregata

Kod multiplikatora vjetroagregata treba biti uležišten svaki rotirajući element planetarnog prijenosnika (uglavnom su to nosač i planeti te sunčanik, dok je prsten uklješten za kućište), kao i ostali rotirajući dijelovi prijenosa koji nisu dio planetarnog prijenosnika, npr. ako postoji dodatni multiplikator nastavno na planetarni prijenosnik u sklopu cijelog multiplikatora vjetroagregata. Na slici 10 prikazan je dvostupanjski planetarni multiplikator s jednim završnim stupnjem čelnika s kosim zubima tvrtke *Romax* [1]. Na slici su prikazani sva ležajna mjesta multiplikatora (plavo-prsten, žuto-valjci).



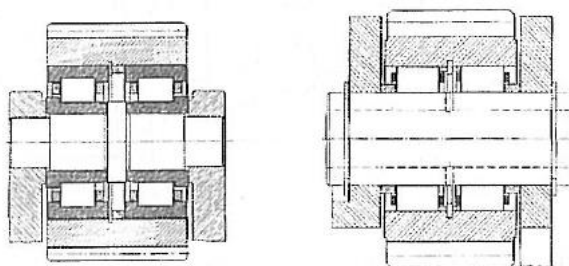
Slika 10. Shematski presjek kroz multiplikator vjetroagregata [12]

Austrijski proizvođač ležajeva NKE [13] razvio je modularni sustav ležajeva primjenjiv u multiplikatorima vjetroturbina od 1,5 MW, 2 MW i 2,5 MW [12]. Dakle, ležaj može biti sastavljen od jednog, dva, tri ili više redova valjaka (slika 11) ovisno o tome koliko je potrebno na pojedinom mjestu unutar nekog multiplikatora da bi se ispunili zahtjevi nosivosti. Ležaj prikazan na slici 11 nema vanjski prsten, a valjci su međusobno povezani jednodjelnim kavezom od mesinga.

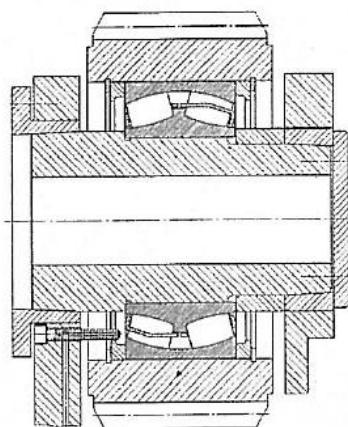


Slika 11. Ležaj tvrtke NKE [12]

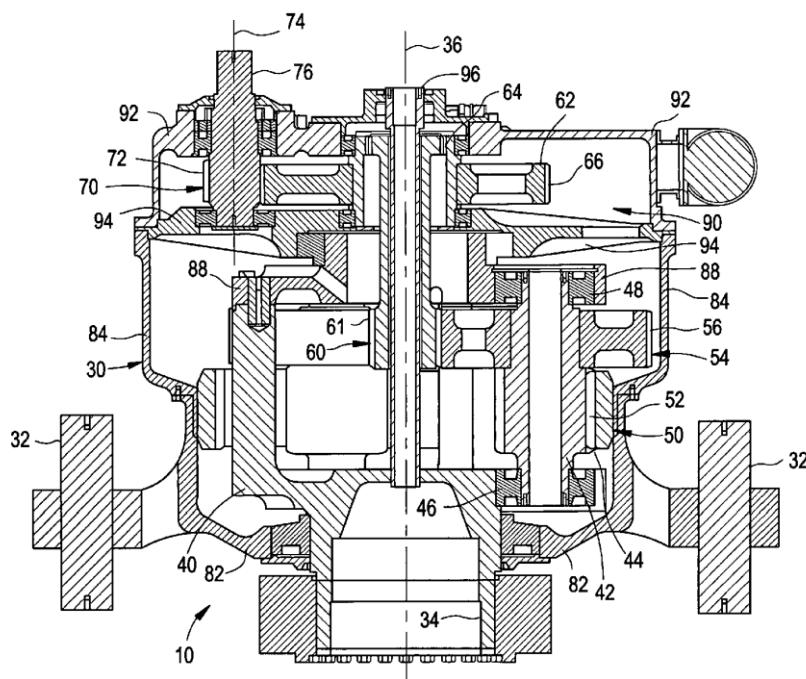
Planeti planetarnog prijenosnika mogu se uležištiti valjkastim ili samopodesivim bačvastim ležajevima (slike 12 i 13). Pri tome vanjski prsten ležaja dodiruje unutarnju stranu planetnog zupčanika, a unutarnji prsten je navučen na ručicu. Slika 14 shematski pokazuje multiplikator vjetroagregata prema patentu US 7008348 B2 [14], u biti je to multiplikator tvrtke *GE* prikazan na slici 5 koji se koristi u izvedbama vjetroagregata snage 1,8 MW, 2,2 MW, 2,7 MW i 3,2 MW. Prema tom patentu vratilo koje nosi dva planetna zupčanika, jedan koji je u zahvatu s prstenom i jedan koji je u zahvatu sa sunčanikom, uležišteno je ležajevima koji se nalaze na krajevima vratila. Ozubljeno vratilo sa slike 14 koje je u zahvatu s prstenom označeno je brojem 42, prsten brojem 54, zupčanik navučen na vratilo, u zahvatu s sunčanikom brojem 56, a ležajevi planeta brojem 48. Prsten 50 je povezan s kućištem preko zupčane spojke naznačene s 50, sunčanik 60 je konzolno učvršćen za zupčanik završnog sutpnja prijenosa 62 preko zupčane spojke 64. Sunčanik 60 je također navučen na cijev 96 kroz koju prolaze potrebne žice za upravljanje vjetroturbinom, to znači da je sunčanik 60 uležišten kliznim ležajem.



**Slika 12. Primjeri uležištenja planeta valjkastim ležajevima [15]**



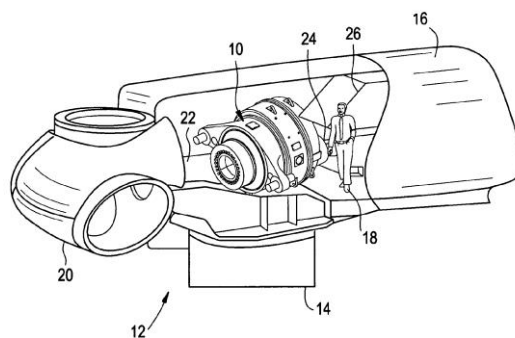
**Slika 13. Uležištenja planeta uporabom samopodesivog valjnog ležaja [15]**



**Slika 14. Multiplikator vjetroagregata prema patentu US 7008348 B2 [14]**

Izlaz snage je preko zupčanika 70 i izlaznog vratila 76 koje je povezano s generatorom. Zatici 32 služe za povezivanje multilikatora s kućištem vjetroagregata. Prikaz multiplikatora zajedno sa siluetom čovjeka unutar kućišta vjetroagregata dan je na slici 15.

**FIG. 1**



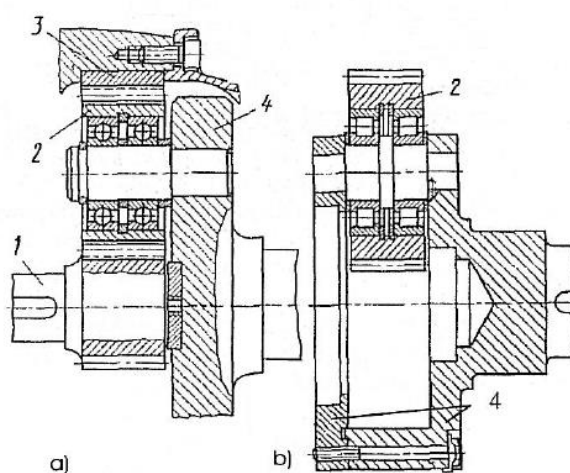
**Slika 15. Multiplikator vjetroagregata sa siluetom čovjeka unutar kućišta vjetroagregata [14]**

Budući da planetarni multiplikatori vjetroagregata prenose velike snage i velike momente, što je već više puta spomenuto, ležajevi multiplikatora su opterećeni velikim silama. Kako valjkasti i bačvasti ležajevi imaju veću nosivost od kugličnih ležajeva za isti promjer, oni se koriste unutar multiplikatora vjetroagregata. Na slici 16 prikazan je jedan dvoredni bačvasti ležaj tvrtke SKF.



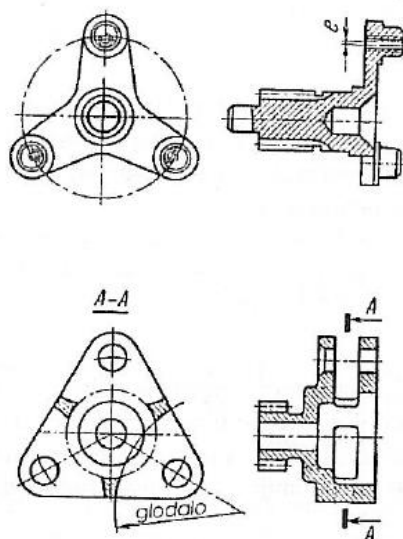
**Slika 16. Dvoredni bačvasti ležaj [16]**

Ručica planetarnog prijenosnika može biti izrađena kao dvodjelna ili kao jednodjelna (slika 17). Pri tome vratilo planeta može biti konzolno uležišteno, ili oslonjeno na oba kraja. Na slici 18 oznakom 1 označen je sunčanik, oznakom 2 planetni zupčanik, 3 prsten i 4 ručica. Jednodjelne konstrukcije ručice mogu biti lijevane ili kovane, te glodane na potrebnim mjestima (slike 18 i 19). Dvodjelne konstrukcije ručice su tehnološki jednostavnije od jednodjelnih.

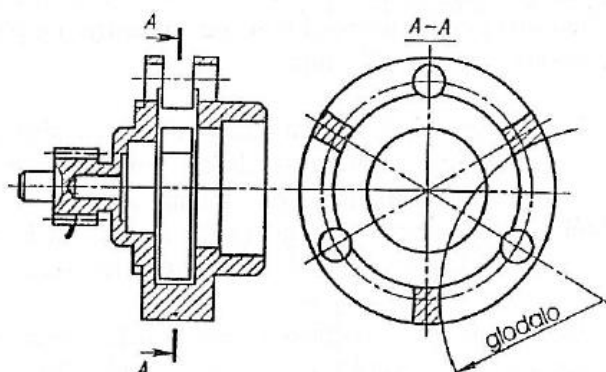


**Slika 17. Izvedbe ručice: a) konzolno vratilo planeta, b) dvodjelna ručica [15]**





**Slika 18. Izvedbe kovanih jednodjeljnih ručica [15]**



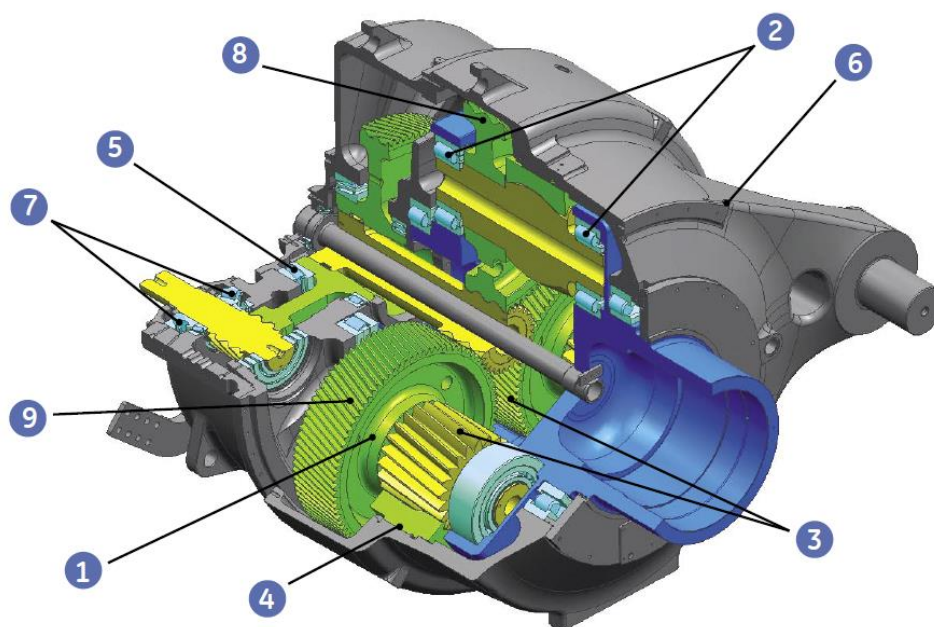
**Slika 19. Lijevana izvedba jednodjeljne ručice [15]**

Kućište multiplikatora je iz tehnoloških razloga, odnosno uvjeta lakše montaže višedjelno, najčešće cilindričnog oblika, kao što je vidljivo sa slike 14. Također, kućište multiplikatora mora imati osigurani prihvata za kućište vjetroagregata, što je u spomenutom patentu US 7008348 [14] učinjeno pomoću zatika (slike 14 i 15). Naglasak u patentu [14] je upravo na višedjelnom kućištu koje olakšava montažu i demontažu prilikom pregleda, popravaka i remonta, te na planetnim zupčanicima koji nisu naizmjenično opterećeni. Dakle, multiplikator u patentu [14] se sastoji od jednog 2UV planetarnog prijenosnika i jednostupanjskog zupčaničkog prijenosnika.



## 2. OPIS MULTIPLIKATORA VJETROAGREGATA IZ ZADATKA

Zadatak je temeljen na patentu US 7008348 B2 [14] koji je vlasništvo tvrtke *General Electric*. Multiplikator vjetroagregata opisan u navedenom patentu također se nalazi i u katalogu multiplikatora vjetroagregata tvrtke *GE* [8]. Slika 14 prikazuje multiplikator u presjeku, dok slika 15 prikazuje multiplikator u kućištu vjetroagregata, obje slike su izvučene iz patenta [14]. Slika 4 prikazuje kataloški prikaz multiplikatora, a slika 6 tablicu specifikacija multiplikatora iz kataloga *GE*, slike 5 i 6 su preuzete iz kataloga [8].

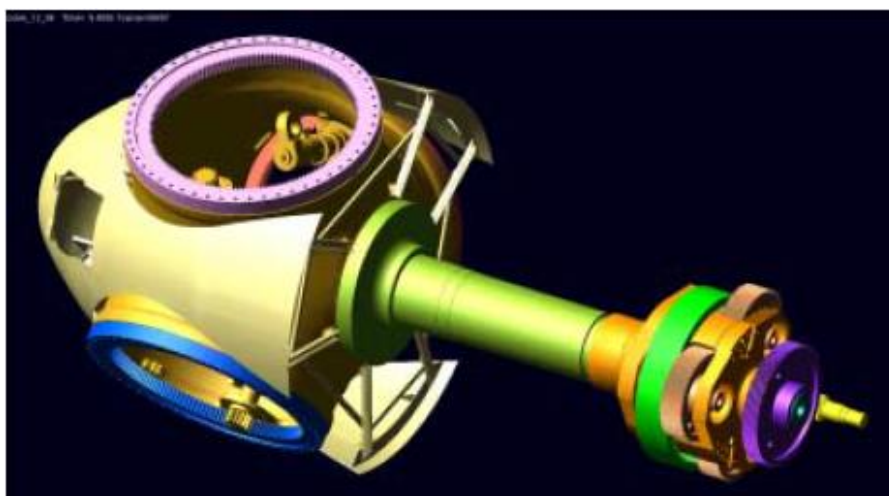


Slika 20. Presjek multiplikatora [17]

Slika 20 prikazuje multiplikator u presjeku s jasnim prikazom detalja, prema [17]:

1. Prvi stupanj, 2VU planetarni prijenosnik – eliminiranjem naizmjeničnog savojnog opterećenja koje je prisutno kod 1UV planetarnih prijenosnika značajno se povećava efikasnost i dugotrajnost prijenosnika.
2. Planetne zupčanike nose nasuprotno postavljeni ležajevi – ležajna mjesta planetnih zupčanika postavljeni izvan planetnog zupčanika omogućavaju da se koriste veći ležajevi te da se vanjska staza ležajeva i planetni zupčanic u međusobnom kontaktu ne troše, to sve povećava pouzdanost.

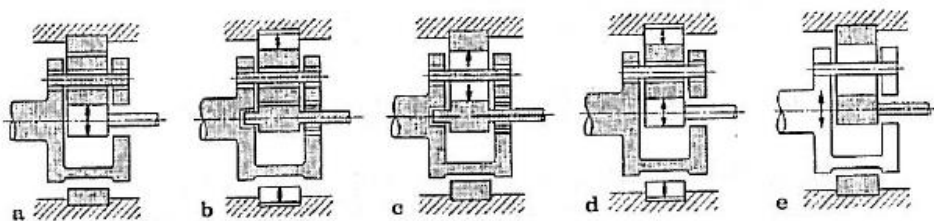
3. Optimiziranje dinamike sustava metodom konačnih površina – bolja distribucija opterećenja i manje dinamičke sile, manje naprezanje i dulji životni vijek zupčanika.
4. Veza između prstenastog zupčanika i kućišta preko zupčaste spojke – zupčasta spojka omogućava da prstenasti zupčanik bude plivajući član i time omogućava da nejednolika raspodjela opterećenja bude minimalna čime se smanjuje naprezanje i povećava pouzdanost.
5. Forsirano podmazivanje svih zupčanika – dostava optimalnog volumena čistog, hladnog sredstva za podmazivanje svim svim ležajevima povećava pouzdanost i trajnost ležaja.
6. Optimizacija strukturalnih elemenata pomoću metode konačnih elemenata – kućište je konstruirano tako da onemogući bilo kakvo izvijanje bez da se nepotrebno povećava masa multiplikatora.
7. Sferni ležajevi na brzohodnom vratilu i zupčaniku – veća nosivost u odnosu na druge oblike ležajeva.
8. Zupčanci s otvrdnutom površinom – zupčanci otporni na trošenje sposobni preuzeti visoka opterećenja.
9. Čelnici s kosim zubima – omogućavaju manje vibracije što smanjuje buku i povećava životni vijek zupčanika



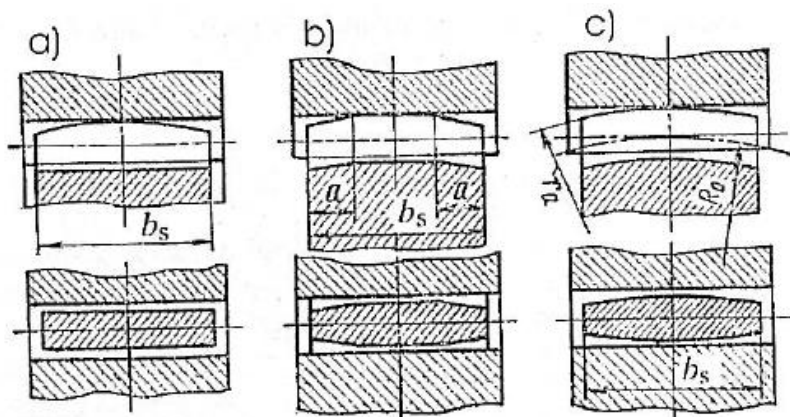
**Slika 21. Multiplikator vjetroagregata izravno je povezan s vjetroturbinom [18]**

Kod svih planetarnih prijenosnika, pa tako i kod multiplikatora vjetroagregata prisutan je problem jednolike raspodjele opterećenja pojedinih elemenata. Za izjednačenje opterećenja u svim dijelovima koji sudjeluju u dijeljenju snage poželjno je, zbog netočnosti izrade zupčanika i vodila, uvesti tzv. *plivajuće članove (elemente)* koji nemaju krutih veza s okolnim elementima, a pod opterećenjem se samonamještaju. Time se kompenziraju greške izrade i montaže. Na primjer, ukoliko je *plivajući element* sunčanik u planetarnom prijenosniku i ako

se sunčani zupčanik iz nekog razloga (npr. djelovanja sile gravitacije) primakne jednom od planeta i zubi uđu u dublji zahvat, poveća se radijalna sila koja sunčani zupčanik odgurne od takvog nepravilnog zahvata. On se time postavi u središnji položaj, koji mu osigurava dobar istovremeni zahvat sa svim planetima, a time i jednoliku raspodjelu prijenosa opterećenja od sunčanog zupčanika na planete. Za izradu *plivajućih* elemenata najčešće se koriste zupčaste spojke s jednostrano ili dvostrano izvedenim ozubljenjem. Time se osigurava neophodno radijalno pomicanje zupčanika u svrhu kompenzacije grešaka proizvodnje.



Slika 22. Principijelne mogućnosti izjednačenja prijenosa opterećenja [15]



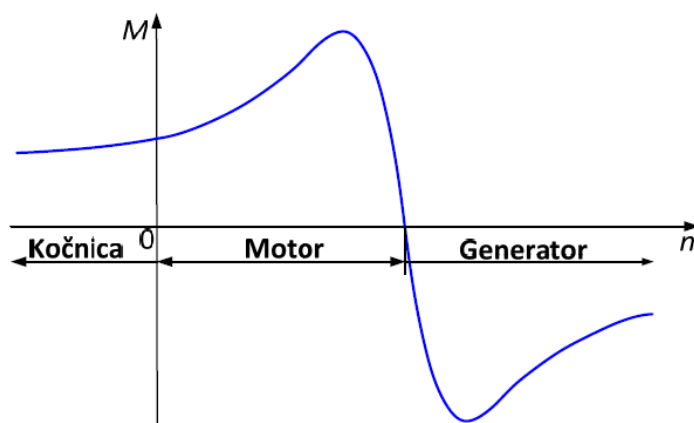
Slika 23. Najčešće korišteni uzdužni profili zuba spojke [15]

U konkretnom primjeru multiplikatora tvrtke *GE* plivajući članovi su prsten i sunčanik koji su zupčastim spojkama povezani s kućištem (prsten – 50, slika 13) i vratilom većeg zupčanika zadnjeg stupnja (sunčanik – 64, slika 13)

Očito je da je konstrukcija multiplikatora vjetroagregata zahtijevan posao koji bi trebao uključivati tim ljudi koji bi se bavio različitim podsustavima multiplikatora i njihovom optimizacijom. Potrebna količina znanja za detaljnu razradu multiplikatora kao dijela

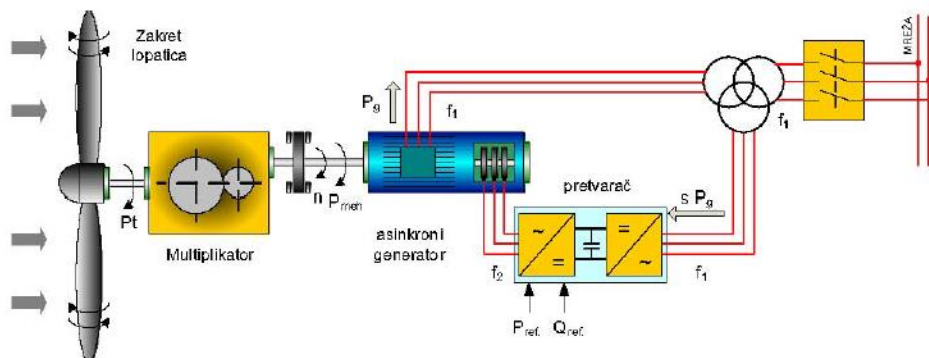
konstrukcije vjetroagregata i ukupna količina posla potrebna za takvu razradu nadilazi obim jednog diplomskog rada. Stoga, ovaj diplomski rad je razradio samo dio cjelokupne razrade konstrukcije multiplikatora. Taj dio koji je razrađen u ovom diplomskom radu sastoji se od dijela proračuna (orijentacijski proračun modula zupčaničkih parova, proračun jednog vratila i ležajnih mjesta), modeliranja svih dijelova i skupa multiplikatora u 3D programskom paketu SolidWorks, sklopnog crteža i radioničkih crteža jednog dijela kućišta, jednog vratila i jednog zupčanika (prstena).

Prijenosni omjer multiplikatora iz zadatka odabran je 1:65 iz razloga što za ulaznu brzinu vrtnje od 16 o/min i multiplikaciju brzine vrtnje 65 puta izlazna brzina vrtnje je 1040 o/min. Sinkrona brzina vrtnje asinkronog generatora s  $p = 3$  pari polova za europsku frekvenciju mreže  $f = 50$  Hz prema izrazu (1) iznosi  $n_s = (60 \cdot f)/p = (60 \cdot 50)/3 = 1000$  o/min. Dakle, nazivna brzina vrtnje asinkronog generatora bila bi blago nadsinkrona, a upravo u nadsinkronim brzinama asinkroni strojevi rade u generatorskom režimu rada, što je vidljivo iz karakteristike asinkronog stroja prikazane na slici 24.



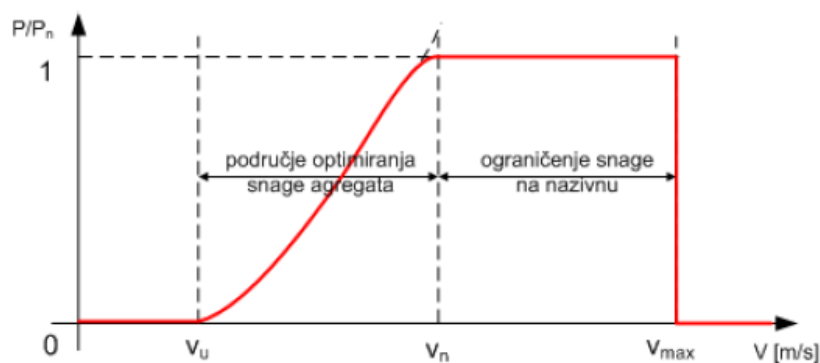
**Slika 24. Karakteristika asinkronog stroja [19]**

Prema [20] GE za svoje vjetroagregate snage 1,5 – 3,6 MW koristi dvostruko hranjene asinkrone generatore. Shema takvog sustava unutar vjetroagregata prikazana je na slici 25. Takav asinkroni generator ima veliku primjenu u vjetroagregatima zbog nepredvidivo promjenjive brzine vjetra, odnosno potrebe regulacije brzine vrtnje turbine [20], [21]. Stator generatora spaja se na mrežu 50 Hz, a rotor se spaja na mrežu preko frekvencijskog pretvarača i transformatora [20], [21].

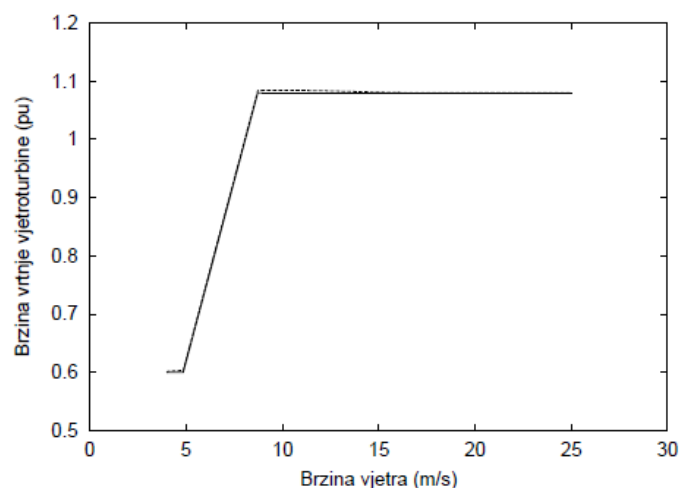


**Slika 25. Vjetroagregat s multiplikatorom, asinkronim generatorom i turbinom promjenjive brzine vrtnje [21]**

Ono što je u izradi rada bilo bitno je najveći moment koji se pojavljuje. S brzinom vjetra raste i snaga koju daje vjetroturbina, no samo do one brzine vjetra na kojoj se postiže nazivna snaga vjetroturbine, na brzinama većim od nazivne brzine snaga ostaje konstantna. Dijagram ovisnosti mehaničke snage o brzini vjetra se nalazi na slici 26. Brzina vrtnje u ovisnosti o brzini vjetra prikazana je na slici 27, dakle i brzina vrtnje vjetroturbine je ograničena na nazivnu brzinu i to u ovisnosti o brzini vjetra. Dakle, najveći moment se pojavljuje u trenutku kada je najveća snaga, a najmanja brzina vrtnje pri kojoj se postiže ta snaga, odnosno u točki  $v_n$  sa slike 26.

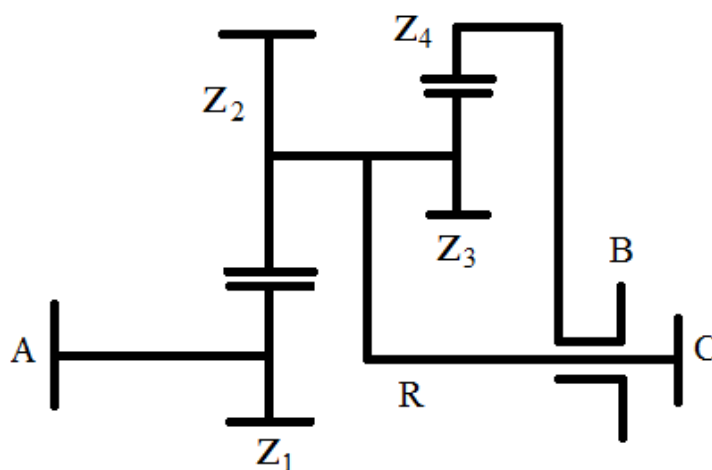


**Slika 26. Tipična statička karakteristika snage vjetroturbine pri upravljanju promjenom napadnog kuta zakretom lopatica [20]**



**Slika 27. Brzina vrtnje vjetroturbine i asinkronog generatora [22]**

Planetarni prijenosnik u multiplikatoru vjetroagregata je 2UV tipa, da bi se moglo pristupiti proračunu potrebno je poznavati kinematiku takvog tipa prijenosnika. Općeniti izrazi za brzine vrtnje pojedinih članova planetarnog prijenosnika mogu se dobiti metodom superpozicije gibanja elemenata prijenosnika. Ta se metoda temelji na slaganju gibanja zupčanika planetarnog prijenosnika i biti će objašnjena na primjeru 2UV planetarnog prijenosnika shematski prikazanog na slici 28.



**Slika 28. Jednostavni planetarni prijenosnik tipa 2UV**

Osnovne kinematske jednadžbe planetarnog prijenosnika 2UV prikazanog na slici 28 glase:

$$\frac{n_1}{n_2} = -\frac{z_2}{z_1} \rightarrow n_2 = -\frac{z_1}{z_2} \cdot n_1 \quad (5)$$

$$\frac{n_1}{n_4} = -\frac{z_2 \cdot z_4}{z_1 \cdot z_3} \rightarrow n_4 = -\frac{z_1 \cdot z_3}{z_2 \cdot z_4} \cdot n_1 \quad (6)$$

U tablici 1 napravljena je kinematska analiza 2UV planetarnog prijenosnika metodom superpozicije gibanja elemenata. U prvom se gibanju zamišlja da se cijeli prijenosnik zakrene za jedan puni okretaj oko centralne osi u smjeru kazaljke na satu, u drugom gibanju sunčanik  $z_1$  se vraća za puni krug nazad uz istovremeno mirovanje ručice prijenosnika, u tom slučaju planeti  $z_2$  i  $z_3$  kao i prsten  $z_4$  zakrenu se za utvrđene prijenosne odnose (16) i (17). Zbrajanjem prva dva gibanja vidjet će se koliko će se okrenuti članovi 2, 3 i 4 ukoliko ručica napravi 1 okretaj, a član 1 miruje.

U trećem gibanju, koje se temelji na drugom gibanju, član 1 giba se brzinom vrtnje  $n_1$  dok ručica miruje pa se ostali članovi moraju vrtjeti utvrđenim brzinama vrtnje. Četvrto gibanje se temelji na sumi prva dva gibanja i u tom slučaju ručica se kreće brzinom vrtnje  $n_R$ , a član 1 miruje, pa su ostali članovi također primorani vrtjeti se utvrđenim brzinama vrtnje. Zbrajanjem trećeg i četvrtog gibanja može se vidjeti kojim će se brzinama vrtnje kretati članovi 2, 3 i 4 ako se član 1 vrti brzinom vrtnje  $n_1$ , a ručica brzinom vrtnje  $n_R$ .

Tablica 1. Kinematska analiza 2UV planetarnog prijenosnika

Redni br. gibanja	Član 1 ( $z_1$ )	Član 2, 3 ( $z_2, z_3$ )	Član 4 ( $z_4$ )	Član R (ručica)
<b>1</b>	+1	+1	+1	+1
<b>2</b>	-1	$+\frac{z_1}{z_2}$	$+\frac{z_1 z_3}{z_2 z_4}$	0
suma prva dva gibanja	0	$1 + \frac{z_1}{z_2}$	$1 + \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4}$	+1
<b>3</b>	$+n_1$	$-\frac{z_1}{z_2} \cdot n_1$	$-\frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} \cdot n_1$	0
<b>4</b>	0	$\left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right) \cdot n_R$	$\left(1 + \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4}\right) \cdot n_R$	$n_R$
suma trećeg i četvrtog gibanja	$+n_1$	$\left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right) \cdot n_R - \frac{z_1}{z_2} \cdot n_1$	$\left(1 + \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4}\right) \cdot n_R - \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} \cdot n_1$	$n_R$

Na osnovi kinematske analize provedene u tablici 1 dobiju se opće zakonitosti gibanja članova planetarnog prijenosnika:

$$n_1 = n_1 \quad (7)$$

$$n_2 = n_3 = \left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right) \cdot n_R - \frac{z_1}{z_2} \cdot n_1 \quad (8)$$

$$n_4 = \left(1 + \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4}\right) \cdot n_R - \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} \cdot n_1 \quad (9)$$

$$n_R = n_R \quad (10)$$



### 3. PRORAČUN

#### 3.1. Ulazne proračunske veličine

Nazivna snaga:  $P_N = 180000 \text{ W}$

Nazivna brzina vrtnje:  $n_N = 16 \text{ o/min}$

Nazivna kutna brzina:  $\omega_N = (n_N \cdot 2\pi)/60 = (16 \cdot 2\pi)/60 = 1,6755 \text{ rad/s}$

Ukupni prijenosni omjer:  $i_{uk} = 1:65 = 0,0153846$

Prijenosni omjer zupčaničkog para:  $i_{II} = 1:4 = 0,25$  (odabrano)

Prijenosni omjer planetarnog prijenosnika:  $i_I = 1:16,25 = 0,06153846$  (odabrano)

Maksimalni moment bez uključenih gubitaka:  $T_{max} = P_N/\omega_N = 180000/1,6755 = 1074296 \text{ Nm}$

Maksimalni moment s uključenim gubiticima (iz kataloga):  $T_{max,g} = 970000 \text{ Nm}$

Razlika momenata bez gubitaka i s gubitkom:  $\Delta T = T_{max} - T_{max,g} = 1074296 - 970000 = 124296 \text{ Nm}$

Razlika momenata izražena postotkom:

$$\Delta T' = 100 \cdot (T_{max} - T_{max,g})/T_{max} = 100 \cdot 124296/1074296 = 9,71 \%$$

#### 3.2. Orijentacijski proračun modula zupčaničkog para (drugog stupnja multiplikatora)

Kut nagiba boka, proizvoljno odabrano:

$$\beta_2 = 14^\circ = \frac{14 \cdot 2\pi}{360} \text{ rad} = 0,244346 \text{ rad} \quad (11)$$

Praktična vrijednost graničnog broja zubi:

$$z_{gr} = 14 \cdot (\cos \beta_2)^3 = 14 \cdot (\cos 0,244346)^3 = 12,8 \quad (12)$$

Broj zubi manjeg zupčanika, odabrano:

$$z_6 = 14 \quad (13)$$

Broj zubi većeg zupčanika:

$$z_5 = \frac{z_6}{i_{II}} = \frac{14}{0,25} = 56 \quad (14)$$

Ako se uzme da oba zupčanika zupčaničkog para imaju parni broj zubi, tada bi nakon svakog punog kruga većeg zupčanika uvijek dolazili isti parovi zuba u zahvat. Da se izbjegne ta situacija, dakle, da se osigura ravnomjernije opterećenje svih zubi uzima se neparan broj zubi većeg zupčanika, pa je odabrano  $z_5 = 55$ .

Novi prijenosni omjer:

$$u_{II} = \frac{z_5}{z_6} = \frac{55}{14} = 3,92857 \quad (15)$$

Razlika prijenosnih omjera:

$$\Delta i_{II} = \frac{u_{II}^{-1} - i_{II}}{u_{II}^{-1}} \cdot 100 \% = \frac{3,92857^{-1} - 0,25}{3,92857^{-1}} = 1,79 \% \quad (16)$$

Nakon iteracije proračuna odabran je materijal manjeg zupčanika  $z_6$  čelik za izradu zupčanika, oznake prema DIN-u 31CrMoV9, nitriran u plinu.

Dinamička izdržljivost na naprezanje u korijenu  $\sigma_{Flim}$  i dopušteno Hertzovo naprezanje  $\sigma_{Hlim}$ , prema [23]:

$$\sigma_{Flim} = 445 \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

$$\sigma_{Hlim} = 1400 \text{ N/mm}^2 \quad (18)$$

Faktor širine zuba za dobro uležištena vratila u kućištu multiplikatora, [23]:

$$\lambda = 25 \quad (19)$$

Za nitrirane materijale orijentacijski proračun modula se vrši u odnosu na dopuštenu opteretivost bokova zuba u odnosu na Hertzov pritisak prema izrazu, [24]:

$$m_{n65} \geq \sqrt[3]{\frac{u_{II}+1}{u_{II}} \cdot \frac{2 \cdot T_{izl,max}}{\lambda \cdot z_6^2 \cdot \sigma_{HP}^2} \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot Z_M^2 \cdot Z_H^2 \cdot Z_\epsilon^2} \quad (20)$$

gdje je:

$$T_{izl,max} = T_{max} \cdot i_1 \cdot u_{II}^{-1} = 1074296 \cdot 0,06153846 \cdot 3,92857^{-1} = 16828 \text{ Nm} \quad (21)$$

gdje se odabire slijedeće:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} = \frac{1400}{2} = 700 \text{ N/mm}^2 \quad (22)$$

gdje je  $S_H = 2$  faktor sigurnosti ljuštenja bokova, odabrano prema [24] i [25], a  $\sigma_{HP}$  dopušteno Hertzovo naprezanje.

Prema [24] i [25] odabire se: faktor oblika (orijentacijski)  $Z_H = 2,5$ , faktor materijala  $Z_M = 190 \sqrt{\text{MPa}}$  (za dodir čelik/čelik),  $Z_\varepsilon = 1$ ,  $K_{H\alpha} = 1$ ,  $K_{H\beta} = 1$ , pa je:

$$m_{n65} \geq \sqrt[3]{\frac{3,92857+1}{3,92857} \cdot \frac{2 \cdot 16828}{25 \cdot 14^2 \cdot 700^2} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 190^2 \cdot 2,5^2 \cdot 1^2} = 15,52 \quad (23)$$

pa se odabire prvi veći standardni modul prema [23] i [25]:

$$m_{n65} = 16 \quad (24)$$

Dimenzije diobenih promjera zupčanika:

$$d_{t6} = \frac{z_6 \cdot m_{n65}}{\cos \beta_2} = \frac{14 \cdot 16}{\cos 14^\circ} = 230,857 \text{ mm} \quad (25)$$

$$d_{t5} = \frac{z_5 \cdot m_{n65}}{\cos \beta_2} = \frac{55 \cdot 16}{\cos 14^\circ} = 906,940 \text{ mm} \quad (26)$$

Osni razmak za nulti par:

$$a_{t65} = \frac{d_{t5} + d_{t6}}{2} = \frac{906,940 + 230,857}{2} = 568,899 \text{ mm} \quad (27)$$

### 3.3. Orijentacijski proračun modula planetarnog prijenosnika (prvog stupnja multiplikatora)

#### 3.3.1. Brzine vrtnje pojedinih elemenata planetarnog stupnja

Brzina ručice, ulazna brzina:  $n_R = n_N = 16 \text{ o/min}$

Brzina prstena:  $n_1 = 0$  (uklješten za kućište)

Brzina izlaznog sunčanika:  $n_4 = \frac{n_R}{i_1} = \frac{16 \cdot 16,25}{1} = 260 \text{ o/min}$

Brzina vrtnje planeta:  $n_2 = n_3 = n_{32} = \left(1 + \frac{z_4}{z_3}\right) \cdot n_R - \frac{z_4}{z_3} \cdot n_4 = \left(1 + \frac{30}{90}\right) \cdot 16 - \frac{30}{90} \cdot 260 = -65,333 \text{ o/min}$

#### 3.3.2. Brojevi zubi pojedinih elemenata planetarnog prijenosnika

Izlazni zupčanik:  $z_4 = 30$

Drugi zupčanik na međuvratilu:  $z_3 = 90$

Prvi zupčanik na međuvratilu:  $z_2 = 24$

$$\text{Prsten: } z_1 = \frac{(n_4 - n_R) \cdot z_4 \cdot z_2}{n_R \cdot z_3} = \frac{(260 - 16) \cdot 30 \cdot 24}{16 \cdot 90} = 122$$

Najveći zajednički nazivnik broja zubi planeta:  $T_g = 6$

$$\text{Minimalni ugradbeni kut: } \delta_{\min} = \frac{360}{z_4 \cdot z_2 + z_3 \cdot z_1} = \frac{360}{30 \cdot 24 + 90 \cdot 122} = 0,03077^\circ$$

Uvijet broja zubi,  $k$  = cijeli broj:  $k = \frac{z_4 \cdot z_2 + z_3 \cdot z_1}{3 \cdot T_g} = \frac{30 \cdot 24 + 90 \cdot 122}{3 \cdot 6} = 650$ , gdje je 3 u nazivniku broj vrtila planetnih zupčanika planetarnog stupnja multiplikatora.

### 3.3.3. Proračun okretnih momenata

Moment na ručici:  $T_R = T_{\max} = 1074296 \text{ Nm}$

Moment na izlazu iz prvog stupnja:  $T_4 = T_R \cdot i_1 = 1074296 \cdot \frac{1}{16,25} = 66111 \text{ Nm}$

Moment na prstenu:  $T_1 = T_R - T_4 = 1074296 - 66111 = 1008185 \text{ Nm}$

Moment na međuvratilu:  $T_3 = T_2 = T_{32} = T_4 \cdot \frac{z_3}{z_4} = T_1 \cdot \frac{z_2}{z_1} = 66111 \cdot \frac{90}{30} = 1008185 \cdot \frac{24}{122} = 198311 \text{ Nm}$

Budući da postoje tri planetna međuvratila, momenti mjerodavni za ulaz u proračun zupčaničkih parova su momenti koji se javljaju na manjim zupčanicima zupčaničkih parova, dakle:

Za zupčanički par  $z_4$ - $z_3$ , moment na jednom zubu zupčanika  $z_4$ :  $T_{z4} = \frac{T_4}{3} = \frac{66111}{3} = 22037 \text{ Nm}$

Za zupčanički par  $z_2$ - $z_1$ , moment na zupčanicu  $z_2$ :  $T_{z2} = \frac{T_{32}}{3} = \frac{198311}{3} = 66111 \text{ Nm}$

### 3.3.4. Orijentacijski proračun modula para $z_4$ - $z_3$

Kut nagiba boka, proizvoljno odabrano:

$$\beta_1 = 10^\circ = \frac{10 \cdot 2\pi}{360} \text{ rad} = 0,174533 \text{ rad} \quad (28)$$

Praktična vrijednost graničnog broja zubi:

$$z_{gr} = 14 \cdot (\cos \beta_1)^3 = 14 \cdot (\cos 0,174533)^3 = 13,4 \quad (29)$$

Prijenosni omjer:

$$u_{I/2} = \frac{z_3}{z_4} = \frac{90}{30} = 3 \quad (30)$$

Nakon iteracije proračuna odabran je materijal manjeg zupčanika  $z_4$ , čelik za izradu zupčanika, oznake prema DIN-u Ck 45, odnosno prema HRN-u Č 1531, nitriran u solnoj kupki.

Dinamička izdržljivost na naprezanje u korijenu  $\sigma_{Flim}$  i dopušteno Hertzovo naprezanje  $\sigma_{Hlim}$ , prema [23]:

$$\sigma_{Flim} = 350 \text{ N/mm}^2 \quad (31)$$

$$\sigma_{Hlim} = 1100 \text{ N/mm}^2 \quad (32)$$

Faktor širine zuba za dobro uležištena vratila u kućištu multiplikatora, [23]:

$$\lambda = 25 \quad (33)$$

Za nitrirane materijale orijentacijski proračun modula se vrši u odnosu na dopuštenu opteretivost bokova zuba u odnosu na Hertzov pritisak prema izrazu, [24]:

$$m_{n43} \geq \sqrt[3]{\frac{u_{I/2}+1}{u_{I/2}} \cdot \frac{2 \cdot T_{z4}}{\lambda \cdot z_4^2 \cdot \sigma_{HP}^2} \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot Z_M^2 \cdot Z_H^2 \cdot Z_\epsilon^2} \quad (34)$$

gdje se odabire slijedeće:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} = \frac{1100}{2} = 550 \text{ N/mm}^2 \quad (35)$$

gdje je  $S_H = 2$  faktor sigurnosti ljuštenja bokova, odabrano prema [24] i [25], a  $\sigma_{HP}$  dopušteno Hertzovo naprezanje.

Prema [24] i [25] odabire se: faktor oblika (orijentacijski)  $Z_H = 2,5$ , faktor materijala  $Z_M = 190 \sqrt{\text{MPa}}$  (za dodir čelik/čelik),  $Z_\epsilon = 1$ ,  $K_{H\alpha} = 1$ ,  $K_{H\beta} = 1$ , pa je:

$$m_{n43} \geq \sqrt[3]{\frac{3+1}{3} \cdot \frac{2 \cdot 22037}{25 \cdot 30^2 \cdot 550^2} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 190^2 \cdot 2,5^2 \cdot 1^2} = 15,14 \quad (36)$$

pa se odabire prvi veći standardni modul prema [23] i [24]:

$$m_{n43} = 16 \quad (37)$$

Dimenzije diobenih promjera zupčanika:

$$d_{t4} = \frac{z_4 \cdot m_{n43}}{\cos \beta_1} = \frac{30 \cdot 16}{\cos 10^\circ} = 487,405 \text{ mm} \quad (38)$$

$$d_{t3} = \frac{z_3 \cdot m_{n43}}{\cos \beta_1} = \frac{90 \cdot 16}{\cos 10^\circ} = 1462,214 \text{ mm} \quad (39)$$

Osni razmak za nulti par:

$$a_{t43} = \frac{d_{t3} + d_{t4}}{2} = \frac{906,940 + 230,857}{2} = 947,810 \text{ mm} \quad (40)$$

### 3.3.5. Orijentacijski proračun modula para $z_2$ - $z_1$

Praktična vrijednost graničnog broja zubi:

$$z_{gr} = 14 \quad (41)$$

Prijenosni omjer:

$$u_{1/1} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{122}{24} = 5,0833 \quad (42)$$

Nakon iteracije proračuna odabran je materijal manjeg zupčanika  $z_4$ , čelik za izradu zupčanika, oznake prema DIN-u 31CrMoV9, nitriran u plinu.

Dinamička izdržljivost na naprezanje u korijenu  $\sigma_{Flim}$  i dopušteno Hertzovo naprezanje  $\sigma_{Hlim}$ , prema [23]:

$$\sigma_{Flim} = 445 \text{ N/mm}^2 \quad (43)$$

$$\sigma_{Hlim} = 1400 \text{ N/mm}^2 \quad (44)$$

Faktor širine zuba za dobro uležištena vratila u kućištu multiplikatora, [23]:

$$\lambda = 25 \quad (45)$$

Za nitrirane materijale orijentacijski proračun modula se vrši u odnosu na dopuštenu opteretivost bokova zuba u odnosu na Hertzov pritisak prema izrazu, [24]:

$$m_{n21} \geq \sqrt[3]{\frac{u_{1/1} + 1}{u_{1/1}} \cdot \frac{2 \cdot T_{z2}}{\lambda \cdot z_2^2 \cdot \sigma_{HP}^2} \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot Z_M^2 \cdot Z_H^2 \cdot Z_\epsilon^2} \quad (46)$$

gdje se odabire slijedeće:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} = \frac{1400}{2} = 700 \text{ N/mm}^2 \quad (47)$$

gdje je  $S_H = 2$  faktor sigurnosti ljuštenja bokova, odabrano prema [24] i [25], a  $\sigma_{HP}$  dopušteno Hertzovo naprezanje.

Prema [24] i [25] odabire se: faktor oblika (orijentacijski)  $Z_H = 2,5$ , faktor materijala  $Z_M = 190 \sqrt{\text{MPa}}$  (za dodir čelik/čelik),  $Z_\epsilon = 1$ ,  $K_{H\alpha} = 1$ ,  $K_{H\beta} = 1$ , pa je:

$$m_{n21} \geq \sqrt[3]{\frac{5,0833+1}{5,0833} \cdot \frac{2 \cdot 66111}{25 \cdot 24^2 \cdot 550^2} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 190^2 \cdot 2,5^2 \cdot 1^2} = 18,24 \quad (48)$$

pa se odabire prvi veći standardni modul prema [23] i [24]:

$$m_{n21} = 20 \quad (49)$$

Dimenzije diobenih promjera zupčanika:

$$d_2 = z_2 \cdot m_{n21} = 24 \cdot 20 = 480 \text{ mm} \quad (50)$$

$$d_1 = z_1 \cdot m_{n21} = 122 \cdot 20 = 2440 \text{ mm} \quad (51)$$

Osnovni razmak za nulti par:

$$a_{21} = \frac{d_1 - d_2}{2} = \frac{2440 - 480}{2} = 980 \text{ mm} \quad (52)$$

### 3.4. Izbor faktora pomaka profila

Da bi bio ispunjen uvjet koaksijalnosti mora nakon pomaka profila vrijediti vrijediti  $a_{wt43} = a_{w21}$ .

#### 3.4.1. Faktor pomaka profila za par $z_4$ - $z_3$

Kutevi zahvatne linije prije pomaka profila:

$$\alpha_{n43} = 20^\circ = 0,349066 \text{ rad} \quad (53)$$

$$\alpha_{t43} = \arctan \frac{\tan \alpha_{n43}}{\cos \beta_1} = \arctan \frac{\tan 20^\circ}{\cos 10^\circ} = 20,28356^\circ = 0,3540149 \text{ rad} \quad (54)$$

Razmak osi nakon pomaka:

$$a_{tw43} = 980 \text{ mm} \quad (55)$$

Kutevi zahvatne linije i nagiba boka nakon pomaka:

$$\cos \alpha_{tw43} = \frac{a_{t43} \cdot \cos \alpha_{t43}}{a_{tw43}} = \frac{974,810 \cdot \cos 20,28356^\circ}{980} = 0,9330205 \quad (56)$$

$$\alpha_{tw43} = \arccos 0,9330205 = 21,08934^\circ = 0,3680784 \quad (57)$$

$$\tan \alpha_{nw43} = \tan \alpha_{tw43} \cdot \cos \beta_1 = \tan 21,08934^\circ \cdot \cos 10^\circ = 0,379795 \quad (58)$$

$$\alpha_{nw43} = \arctan 0,379795 = 20,79654^\circ = 0,362968 \text{ rad} \quad (59)$$

$$\tan \beta_{b43} = \frac{\cos \alpha_{t43} \cdot \tan \beta_1}{\cos \alpha_{tw43}} = \frac{\cos 20,28356^\circ \cdot \tan 10^\circ}{\cos 21,08934^\circ} = 0,1772685 \quad (60)$$

$$\beta_{b43} = \arctan 0,1772685 = 10,052163^\circ = 0,17544334 \text{ rad} \quad (61)$$

Evolventne funkcije:

$$\text{ev } \alpha_{n43} = \tan \alpha_{n43} - \alpha_{n43} = \tan 0,349066 - 0,349066 = 0,0149044 \quad (62)$$

$$\text{ev } \alpha_{t43} = \tan \alpha_{t43} - \alpha_{t43} = \tan 0,3540149 - 0,3540149 = 0,015570165 \quad (63)$$

$$\text{ev } \alpha_{tw43} = \tan \alpha_{tw43} - \alpha_{tw43} = \tan 0,3680784 - 0,3680784 = 0,0175757 \quad (64)$$

Faktor pomaka profila:

$$x_4 + x_3 = \frac{(z_4 + z_3) \cdot (\text{ev } \alpha_{tw43} - \text{ev } \alpha_{t43})}{2 \cdot \tan \alpha_{n43}} = \frac{(30 + 90) \cdot (0,0175757 - 0,015570165)}{2 \cdot \tan 20^\circ} = 0,3306 \quad (65)$$

Pomaci profila (proizvoljno odabrano):

$$x_4 = 0,22 \quad (66)$$

$$x_3 = 0,1106 \quad (67)$$

### 3.4.2. Faktor pomaka profila za par $z_2$ - $z_1$

$$a_{w21} = a_{21} = 980 \text{ mm} \quad (68)$$

$$x_1 + x_2 = 0 \quad (69)$$

$$x_2 = 0 \quad (70)$$

$$x_1 = 0 \quad (71)$$

### 3.4.3. Faktor pomaka profila za par $z_6$ - $z_5$

Razmak osi nakon pomaka:

$$a_{wt65} = 570 \text{ mm} \quad (72)$$

Kutevi zahvatne linije prije pomaka profila:

$$\alpha_{n65} = 20^\circ = 0,349066 \text{ rad} \quad (73)$$

$$\alpha_{t65} = \arctan \frac{\tan \alpha_{n65}}{\cos \beta_2} = \arctan \frac{\tan 20^\circ}{\cos 14^\circ} = 20,561705^\circ = 0,3751127 \text{ rad} \quad (74)$$

Kutevi zahvatne linije i nagiba boka nakon pomaka:



$$\cos \alpha_{tw65} = \frac{a_{t65} \cdot \cos \alpha_{t65}}{a_{tw65}} = \frac{568,899 \cdot \cos 20,561705^\circ}{570} = 0,9344855 \quad (75)$$

$$\alpha_{tw65} = \arccos 0,9344855 = 20,85482^\circ = 0,3639852 \quad (76)$$

$$\tan \alpha_{nw65} = \tan \alpha_{tw65} \cdot \cos \beta_2 = \tan 20,85482^\circ \cdot \cos 14^\circ = 0,3696434 \quad (77)$$

$$\alpha_{nw65} = \arctan 0,3696434 = 20,286502^\circ = 0,354066 \text{ rad} \quad (78)$$

$$\tan \beta_{b65} = \frac{\cos \alpha_{t65} \cdot \tan \beta_2}{\cos \alpha_{tw65}} = \frac{\cos 20,561705^\circ \cdot \tan 14^\circ}{\cos 20,85482^\circ} = 0,2498107 \quad (79)$$

$$\beta_{b65} = \arctan 0,2498107 = 14,02603^\circ = 0,2448004 \text{ rad} \quad (80)$$

Evolventne funkcije:

$$\text{ev } \alpha_{n65} = \tan \alpha_{n65} - \alpha_{n65} = \tan 0,349066 - 0,349066 = 0,0149044 \quad (81)$$

$$\text{ev } \alpha_{t65} = \tan \alpha_{t65} - \alpha_{t65} = \tan 0,3751127 - 0,3751127 = 0,01624323 \quad (82)$$

$$\text{ev } \alpha_{tw65} = \tan \alpha_{tw65} - \alpha_{tw65} = \tan 0,3639852 - 0,3639852 = 0,01697433 \quad (83)$$

Faktor pomaka profila:

$$x_4 + x_3 = \frac{(z_4 + z_3) \cdot (\text{ev } \alpha_{tw43} - \text{ev } \alpha_{t43})}{2 \cdot \tan \alpha_{n43}} = \frac{(30 + 90) \cdot (0,01697433 - 0,01624323)}{2 \cdot \tan 20^\circ} = 0,0693 \quad (84)$$

Pomaci profila (proizvoljno odabrano):

$$x_6 = 0 \quad (85)$$

$$x_5 = 0,0693 \quad (86)$$

### 3.5. Dimenzije zupčanika u odnosu na korekcijske faktore

Zupčanik  $z_6$ :

$$\text{Diobeni promjer: } d_{t6} = \frac{z_6 \cdot m_{n65}}{\cos \beta_2} = \frac{14 \cdot 16}{\cos 14^\circ} = 230,8575 \text{ mm}$$

$$\text{Tjemeni promjer: } d_{ta6} = d_{t6} + 2 \cdot m_{n65} \cdot (1 + x_6) = 230,8575 + 2 \cdot 16 \cdot (1 + 0) = 262,8575 \text{ mm}$$

$$\text{Podnožni promjer: } d_{tf6} = d_{t6} + 2 \cdot m_{n65} \cdot (x_6 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot m_{n65} = 230,8575 + 2 \cdot 16 \cdot (0 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot 16 = 190,8575 \text{ mm}$$

$$\text{Kinematski promjer: } d_{tw6} = \frac{d_{t6} \cdot \cos \alpha_{t65}}{\cos \alpha_{tw65}} = \frac{230,8575 \cdot \cos 20,561705^\circ}{\cos 20,85482^\circ} = 231,3043 \text{ mm}$$

$$\text{Temeljeni promjer: } d_{b6} = d_{t6} \cdot \cos \alpha_{tw65} = 230,8575 \cdot \cos 20,85482^\circ = 216,1506 \text{ mm}$$

Zupčanik  $z_5$ :

$$\text{Diobeni promjer: } d_{t5} = \frac{z_5 \cdot m_{n65}}{\cos \beta_2} = \frac{55 \cdot 16}{\cos 14} = 906,940 \text{ mm}$$

$$\text{Tjemeni promjer: } d_{ta5} = d_{t5} + 2 \cdot m_{n65} \cdot (1 + x_5) = 906,940 + 2 \cdot 16 \cdot (1 + 0,0693) = 941,1576 \text{ mm}$$

$$\text{Podnožni promjer: } d_{tf5} = d_{t5} + 2 \cdot m_{n65} \cdot (x_5 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot m_{n65} = 906,940 + 2 \cdot 16 \cdot (0,693 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot 16 = 869,1576 \text{ mm}$$

$$\text{Kinematski promjer: } d_{tw5} = \frac{d_{t5} \cdot \cos \alpha_{t65}}{\cos \alpha_{tw65}} = \frac{906,940 \cdot \cos 20,561705^\circ}{\cos 20,85482^\circ} = 908,6957 \text{ mm}$$

$$\text{Temeljeni promjer: } d_{b5} = d_{t5} \cdot \cos \alpha_{tw65} = 906,940 \cdot \cos 20,85482^\circ = 849,1629 \text{ mm}$$

Zupčanik  $z_4$ :

$$\text{Diobeni promjer: } d_{t4} = \frac{z_4 \cdot m_{n43}}{\cos \beta_1} = \frac{30 \cdot 16}{\cos 10} = 487,4048 \text{ mm}$$

$$\text{Tjemeni promjer: } d_{ta4} = d_{t4} + 2 \cdot m_{n43} \cdot (1 + x_4) = 487,4048 + 2 \cdot 16 \cdot (1 + 0,22) = 526,4448 \text{ mm}$$

$$\text{Podnožni promjer: } d_{tf4} = d_{t4} + 2 \cdot m_{n43} \cdot (x_4 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot m_{n43} = 487,4048 + 2 \cdot 16 \cdot (0,22 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot 16 = 454,4448 \text{ mm}$$

$$\text{Kinematski promjer: } d_{tw4} = \frac{d_{t4} \cdot \cos \alpha_{t43}}{\cos \alpha_{tw43}} = \frac{487,4048 \cdot \cos 20,28356^\circ}{\cos 21,08934^\circ} = 490 \text{ mm}$$

$$\text{Temeljeni promjer: } d_{b4} = d_{t4} \cdot \cos \alpha_{tw43} = 487,4048 \cdot \cos 21,08934^\circ = 457,180 \text{ mm}$$

Zupčanik  $z_3$ :

$$\text{Diobeni promjer: } d_{t3} = \frac{z_3 \cdot m_{n43}}{\cos \beta_1} = \frac{90 \cdot 16}{\cos 10} = 1462,2143 \text{ mm}$$

$$\text{Tjemeni promjer: } d_{ta3} = d_{t3} + 2 \cdot m_{n43} \cdot (1 + x_3) = 1462,2143 + 2 \cdot 16 \cdot (1 + 0,1106) = 1497,7540 \text{ mm}$$

$$\text{Podnožni promjer: } d_{tf3} = d_{t3} + 2 \cdot m_{n43} \cdot (x_3 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot m_{n43} = 1462,2143 + 2 \cdot 16 \cdot (0,1106 - 1) - 2 \cdot 0,25 \cdot 16 = 1425,7540 \text{ mm}$$

$$\text{Kinematski promjer: } d_{tw3} = \frac{d_{t3} \cdot \cos \alpha_{t43}}{\cos \alpha_{tw43}} = \frac{1462,2143 \cdot \cos 20,28356^\circ}{\cos 21,08934^\circ} = 1470 \text{ mm}$$

$$\text{Temeljeni promjer: } d_{b3} = d_{t3} \cdot \cos \alpha_{tw43} = 1462,2143 \cdot \cos 21,08934^\circ = 1371,5401 \text{ mm}$$

Zupčanik  $z_2$ :

$$\text{Diobeni promjer: } d_2 = z_2 \cdot m_{n21} = 24 \cdot 20 = 480 \text{ mm}$$

$$\text{Tjemeni promjer: } d_{a2} = d_2 + 2 \cdot m_{n21} = 480 + 2 \cdot 20 = 520 \text{ mm}$$

$$\text{Podnožni promjer: } d_{f2} = d_2 - 2 \cdot m_{n21} - 2 \cdot 0,25 \cdot m_{n21} = 480 - 2 \cdot 20 - 2 \cdot 0,25 \cdot 20 = 430 \text{ mm}$$

$$\text{Kinematski promjer: } d_{w2} = d_2 = 480 \text{ mm}$$

$$\text{Temeljeni promjer: } d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_{w21} = 480 \cdot \cos 20^\circ = 451,0525 \text{ mm}$$

Zupčanik  $z_1$ :

$$\text{Diobeni promjer: } d_1 = z_1 \cdot m_{n21} = 122 \cdot 20 = 2440 \text{ mm}$$

$$\text{Tjemeni promjer: } d_{a1} = d_1 + 2 \cdot m_{n21} = 2440 + 2 \cdot 20 = 2480 \text{ mm}$$

$$\text{Podnožni promjer: } d_{f1} = d_1 - 2 \cdot m_{n21} - 2 \cdot 0,25 \cdot m_{n21} = 2440 - 2 \cdot 20 - 2 \cdot 0,25 \cdot 20 = 2390 \text{ mm}$$

$$\text{Kinematski promjer: } d_{w1} = d_1 = 2440 \text{ mm}$$

$$\text{Temeljeni promjer: } d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_{w21} = 2440 \cdot \cos 20^\circ = 2292,850 \text{ mm}$$

### 3.5.1. Kontrola tjemenih zračnosti

$$c_{65} = a_{wt65} - \frac{(d_{ta6} + d_{tf5})}{2} = 570 - \frac{(262,8575 + 869,1576)}{2} = a_{wt65} - \frac{(d_{tf6} + d_{ta5})}{2} = 570 - \frac{(190,8575 + 941,1576)}{2} = 3,9925 \text{ mm} \quad (87)$$

$$c_{65min} = 0,12 \cdot m_{n65} = 0,12 \cdot 16 = 1,92 \text{ mm} \quad (88)$$

$$c_{43} = a_{wt43} - \frac{(d_{ta4} + d_{tf3})}{2} = 980 - \frac{(526,4448 + 1425,7540)}{2} = a_{wt43} - \frac{(d_{tf4} + d_{ta3})}{2} = 980 - \frac{(454,4448 + 1497,7540)}{2} = 3,9006 \text{ mm} \quad (89)$$

$$c_{43\min} = 0,12 \cdot m_{n43} = 0,12 \cdot 16 = 1,92 \text{ mm} \quad (90)$$

$$c_{21} = a_{w21} - \frac{(d_{a2} + d_{f1})}{2} = 980 - \frac{(520 + 2490)}{2} = a_{w21} - \frac{(d_{f2} + d_{a1})}{2} = 980 - \frac{(430 + 2400)}{2} = 5 \text{ mm} \quad (91)$$

$$c_{21\min} = 0,12 \cdot m_{n21} = 0,12 \cdot 20 = 2,4 \text{ mm} \quad (92)$$

### 3.6. Kriterij susjednosti

Prema [5]:

$$N \leq \frac{\pi}{\arcsin \frac{d_{ta3} + m_{n43}}{d_{tw4} + d_{tw3}}} = \frac{\pi}{\arcsin \frac{1497,7540 + 16}{490 + 1470}} = 3,56 \quad (93)$$

odnosno:

$$N \leq \frac{\pi}{\arcsin \frac{d_{ta3} + m_{n43}}{d_{w2} - d_{w1}}} = \frac{\pi}{\arcsin \frac{1497,7540 + 16}{480 + 2440}} = -3,56 \quad (94)$$

odnosno:

$$2 \cdot a_{wt43} \cdot \sin \frac{\pi}{3} \geq d_{ta3} + m_{n43} \quad (95)$$

Dakle, budući da planetarni stupanj prijenosa multiplikatora ima 3 planeta, kriterij susjednosti je zadovoljen.

### 3.7. Ostvarivanje potrebne bočne zračnosti primicanjem alata

#### 3.7.1. Par $z_2$ - $z_1$

Određivanje nazivne mjere preko nekoliko zubi za kontrolu graničnih odstupanja (tolerancije):

Mjerni broj zubi nazivne izmjere zupčanika  $z_1$ :

$$\tan \alpha_{x1} = \sqrt{(\tan \alpha_{21})^2 + \frac{4 \cdot (x_1/z_1) \cdot (1 + x_1/z_1)}{\cos \alpha_{21}}} = \sqrt{(\tan 20^\circ)^2 + \frac{4 \cdot (0/122) \cdot (1 + 0/122)}{\cos 20^\circ}} = 0,36397 \quad (96)$$

$$z_{w1} = \frac{z_1}{\pi} \cdot (\tan \alpha_{x1} - \text{ev } \alpha_{21}) - \frac{2 \cdot x_1 \cdot \tan \alpha_{21}}{\pi} = \frac{122}{\pi} \cdot (\tan 20^\circ - \text{ev } 20^\circ) - \frac{2 \cdot 0 \cdot \tan 20^\circ}{\pi} = \frac{122}{\pi} \cdot (0,36397 - 0,0149044) - \frac{2 \cdot 0 \cdot 0,36397}{\pi} = 14,056 = 15 \quad (97)$$

Nazivna mjera preko nekoliko zubi za zupčanik  $z_1$ :

$$W_1 = m_{n21} \cdot \cos \alpha_{21} \cdot (\pi \cdot (z_{w1} - 0,5) + z_1 \cdot \text{ev } \alpha_{21} + 2 \cdot x_1 \cdot \tan \alpha_{21}) = 20 \cdot \cos 20^\circ \cdot (\pi \cdot (15 - 0,5) + 122 \cdot \text{ev } 20^\circ + 2 \cdot 0 \cdot \tan 20^\circ) = 862,841 \text{ mm} \quad (98)$$

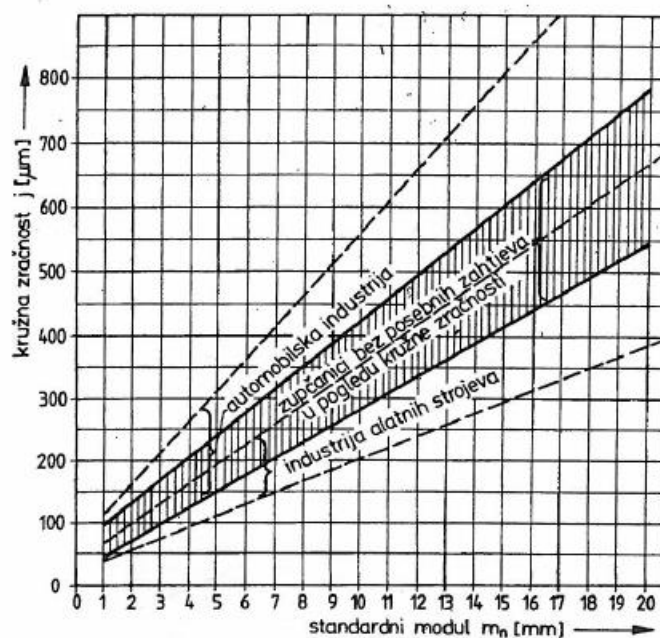
Mjerni broj zubi nazivne izmjere zupčanika  $z_2$ :

$$\tan \alpha_{x2} = \sqrt{(\tan \alpha_{21})^2 + \frac{4 \cdot (x_2/z_2) \cdot (1+x_2/z_2)}{\cos \alpha_{21}}} = \sqrt{(\tan 20^\circ)^2 + \frac{4 \cdot (0/24) \cdot (1+0/24)}{\cos 20^\circ}} = 0,36397 \quad (99)$$

$$z_{w2} = \frac{z_2}{\pi} \cdot (\tan \alpha_{x2} - \text{ev } \alpha_{21}) - \frac{2 \cdot x_2 \cdot \tan \alpha_{21}}{\pi} = \frac{24}{\pi} \cdot (\tan 20^\circ - \text{ev } 20^\circ) - \frac{2 \cdot 0 \cdot \tan 20^\circ}{\pi} = \frac{24}{\pi} \cdot (0,36397 - 0,0149044) - \frac{2 \cdot 0 \cdot 0,36397}{\pi} = 3,167 = 4 \quad (100)$$

Nazivna mjera preko nekoliko zubi za zupčanik  $z_2$ :

$$W_2 = m_{n21} \cdot \cos \alpha_{21} \cdot (\pi \cdot (z_{w2} - 0,5) + z_2 \cdot \text{ev } \alpha_{21} + 2 \cdot x_2 \cdot \tan \alpha_{21}) = 20 \cdot \cos 20^\circ \cdot (\pi \cdot (4 - 0,5) + 24 \cdot \text{ev } 20^\circ + 2 \cdot 0 \cdot \tan 20^\circ) = 213,372 \text{ mm} \quad (101)$$



**Slika 29.** Orijentacija pri izboru kružne zračnosti dana u zavisnosti od modula i područja primjene [24]

Izbor kružne zračnosti, prema [24], str. 111 (slika 29) za  $m_{n21} = 20$ :

$$j_{\max 21} = 780 \mu\text{m} \quad (102)$$

$$j_{\min 21} = 550 \mu\text{m} \quad (103)$$

Kvaliteta tolerancije razmaka osi*	1	2	3	4	5	6
Kvaliteta tolerancije zupčanika*	1 i 2	3 i 4	5 i 6	7 i 8	9 i 10	11 i 12
više od ... do						
6 ... 10	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 8$	$\pm 11$	$\pm 18$	$\pm 45$
10 ... 18	$\pm 3$	$\pm 6$	$\pm 9$	$\pm 14$	$\pm 22$	$\pm 55$
18 ... 30	$\pm 3$	$\pm 7$	$\pm 11$	$\pm 17$	$\pm 26$	$\pm 65$
30 ... 50	$\pm 4$	$\pm 8$	$\pm 13$	$\pm 20$	$\pm 31$	$\pm 80$
50 ... 80	$\pm 4$	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 23$	$\pm 37$	$\pm 95$
80 ... 120	$\pm 5$	$\pm 11$	$\pm 18$	$\pm 27$	$\pm 44$	$\pm 110$
120 ... 180	$\pm 6$	$\pm 13$	$\pm 20$	$\pm 32$	$\pm 50$	$\pm 125$
180 ... 250	$\pm 7$	$\pm 15$	$\pm 23$	$\pm 36$	$\pm 58$	$\pm 145$
250 ... 315	$\pm 8$	$\pm 16$	$\pm 26$	$\pm 41$	$\pm 65$	$\pm 160$
315 ... 400	$\pm 9$	$\pm 18$	$\pm 29$	$\pm 45$	$\pm 70$	$\pm 180$
400 ... 500	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 32$	$\pm 49$	$\pm 78$	$\pm 200$
500 ... 630		$\pm 22$	$\pm 35$	$\pm 55$	$\pm 88$	$\pm 220$
630 ... 800		$\pm 25$	$\pm 40$	$\pm 63$	$\pm 100$	$\pm 250$
800 ... 1000		$\pm 28$	$\pm 45$	$\pm 70$	$\pm 115$	$\pm 280$
1000 ... 1250		$\pm 33$	$\pm 53$	$\pm 83$	$\pm 130$	$\pm 330$
1250 ... 1600		$\pm 39$	$\pm 63$	$\pm 98$	$\pm 155$	$\pm 390$
1600 ... 2000		$\pm 46$	$\pm 75$	$\pm 115$	$\pm 185$	$\pm 460$

Slika 30. Vrijednosti graničnih odstupanja razmaka osi  $A_{a,g}$ ,  $A_{a,d}$  u ovisnosti o području nazivne mjere razmaka osi i kvalitete [24]

Vrijednost graničnog odstupanja razmaka osi za kvalitetu zupčanika 9 i razmak osi  $a_{w21} = 980$  mm, prema [24], str. 112 (slika 30):

$$A_{a,g,d} = \pm 115 \mu\text{m} \quad (104)$$

Granična odstupanja debljine zubi  $A_{W1,2}$  uz odabranu kružnu zračnost  $j_{\max 21}$  i  $j_{\min 21}$  i granična odstupanja razmaka osi vratila  $A_a$ :

$$-(A_{W2,d} + A_{W1,d}) = j_{\max 21} \cdot \cos \alpha_{21} - 2 \cdot A_{a,g} \cdot \sin \alpha_{w21} = 780 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot 115 \cdot \sin 20^\circ = 654,3 \mu\text{m} \quad (105)$$

$$-(A_{W2,g} + A_{W1,g}) = j_{\min 21} \cdot \cos \alpha_{21} - 2 \cdot A_{a,d} \cdot \sin \alpha_{w21} = 780 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot (-115) \cdot \sin 20^\circ = 595,5 \mu\text{m} \quad (106)$$

Mjere u  $\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m} = 0.001\text{mm}$ )

Standardni modul $m_n$ [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30	32	35	38	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	220	240	260	280	300	320	350	380	400	450	500	550	600	650	700	750	800	900	1000
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Kvaliteta 9

Granična odstupanja  $A_w$  [ $\mu\text{m}$ ]

j	h	g	f	e	d	c	b	a	z'	y'	x'	w'	v'	u'	t'	s'	r
+24	0	-48	-96	-144	-192	-240	-288	-336	-432	-528	-624	-720	-816	-912	-1008	-1104	-1200
+26	0	-52	-104	-156	-208	-260	-312	-364	-468	-572	-676	-780	-884	-988	-1092	-1196	-1300
+27	0	-54	-108	-162	-216	-270	-324	-378	-486	-594	-702	-810	-918	-1026	-1134	-1242	-1350
+29	0	-59	-116	-174	-232	-290	-348	-406	-522	-638	-754	-870	-986	-1102	-1218	-1334	-1450
+31	0	-62	-124	-188	-256	-320	-384	-448	-568	-688	-808	-928	-1048	-1168	-1288	-1408	-1528
+33	0	-66	-132	-198	-264	-336	-408	-480	-600	-720	-840	-960	-1080	-1200	-1320	-1440	-1560
+35	0	-70	-140	-210	-280	-360	-440	-520	-640	-760	-880	-1000	-1120	-1240	-1360	-1480	-1600
+38	0	-72	-144	-216	-288	-384	-480	-576	-702	-828	-954	-1080	-1206	-1332	-1458	-1584	-1710
+39	0	-74	-152	-228	-304	-384	-480	-576	-702	-828	-954	-1080	-1206	-1332	-1458	-1584	-1710
+40	0	-76	-156	-232	-304	-384	-480	-576	-702	-828	-954	-1080	-1206	-1332	-1458	-1584	-1710
+42	0	-80	-160	-240	-320	-400	-480	-560	-720	-840	-960	-1080	-1200	-1320	-1440	-1560	-1680
+44	0	-84	-168	-252	-336	-420	-504	-588	-768	-888	-1008	-1128	-1248	-1368	-1488	-1608	-1728
+46	0	-88	-176	-264	-352	-440	-528	-616	-808	-928	-1048	-1168	-1288	-1408	-1528	-1648	-1768
+47	0	-90	-180	-270	-360	-450	-540	-630	-828	-948	-1068	-1188	-1308	-1428	-1548	-1668	-1788
+49	0	-94	-188	-282	-376	-470	-564	-658	-864	-984	-1104	-1224	-1344	-1464	-1584	-1704	-1824
+51	0	-98	-196	-294	-392	-496	-596	-696	-912	-1032	-1152	-1272	-1392	-1512	-1632	-1752	-1872
+53	0	-102	-204	-308	-408	-512	-612	-712	-936	-1056	-1176	-1296	-1416	-1536	-1656	-1776	-1896
+54	0	-104	-208	-312	-416	-520	-624	-728	-960	-1080	-1200	-1320	-1440	-1560	-1680	-1800	-1920
+56	0	-108	-216	-324	-432	-544	-656	-768	-1008	-1128	-1248	-1368	-1488	-1608	-1728	-1848	-1968
+58	0	-112	-224	-336	-448	-568	-688	-808	-1056	-1176	-1296	-1416	-1536	-1656	-1776	-1896	-2016
+59	0	-116	-232	-348	-464	-584	-704	-824	-1080	-1200	-1320	-1440	-1560	-1680	-1800	-1920	-2040
+60	0	-120	-240	-360	-480	-600	-720	-840	-1104	-1224	-1344	-1464	-1584	-1704	-1824	-1944	-2064
+62	0	-124	-248	-372	-496	-624	-752	-880	-1152	-1272	-1392	-1512	-1632	-1752	-1872	-1992	-2112
+63	0	-128	-256	-384	-512	-640	-768	-896	-1184	-1304	-1424	-1544	-1664	-1784	-1904	-2024	-2144
+65	0	-132	-264	-392	-528	-656	-784	-912	-1216	-1336	-1456	-1576	-1696	-1816	-1936	-2056	-2176
+67	0	-136	-272	-400	-536	-672	-808	-944	-1248	-1368	-1488	-1608	-1728	-1848	-1968	-2088	-2208
+69	0	-140	-280	-416	-560	-704	-848	-992	-1296	-1416	-1536	-1656	-1776	-1896	-2016	-2136	-2256
+71	0	-144	-288	-432	-584	-736	-888	-1040	-1344	-1464	-1584	-1704	-1824	-1944	-2064	-2184	-2304
+72	0	-148	-296	-444	-592	-744	-896	-1056	-1360	-1480	-1600	-1720	-1840	-1960	-2080	-2200	-2320
+74	0	-152	-304	-456	-608	-760	-912	-1072	-1376	-1496	-1616	-1736	-1856	-1976	-2096	-2216	-2336
+76	0	-158	-312	-468	-624	-784	-936	-1104	-1408	-1528	-1648	-1768	-1888	-2008	-2128	-2248	-2368
+78	0	-164	-320	-480	-640	-800	-960	-1120	-1440	-1560	-1680	-1800	-1920	-2040	-2160	-2280	-2400

Razlomljene vrijednosti standardnog modula zaokružuju se na principu:  
od 0,5 do 1,49 → 1  
od 1,5 do 2,49 → 2

Primjeri:  $m_n = 5\text{ mm}$ ,  $d = 100\text{ mm}$ , kvaliteta 9ab,  $A_{wg} = -420\text{ }\mu\text{m}$   $A_{wg} = -280\text{ }\mu\text{m}$   
 $m_n = 5\text{ mm}$ ,  $d = 480\text{ mm}$ , kvaliteta 9ab,  $A_{wg} = -480\text{ }\mu\text{m}$   $A_{wg} = -320\text{ }\mu\text{m}$   
 $m_n = 10\text{ mm}$ ,  $d = 260\text{ mm}$ , kvaliteta 9fa,  $A_{wg} = -658\text{ }\mu\text{m}$   $A_{wg} = -198\text{ }\mu\text{m}$   
 $m_n = 10\text{ mm}$ ,  $d = 1000\text{ mm}$ , kvaliteta 9fa,  $A_{wg} = -755\text{ }\mu\text{m}$   $A_{wg} = -216\text{ }\mu\text{m}$

Slika 31. Vrijednosti graničnih odstupanja debljine zuba  $A_w$  u ovisnosti o modulu i promjeru diobene kružnice za kvalitetu izrade zupčanika 9 [24]

Za  $m_{n21} = 20\text{ mm}$ ,  $d_1 = 2440\text{ mm}$ ,  $d_2 = 480\text{ mm}$  i kvalitetu zupčanika 9 (odabrano), prema [24], str 110 (slika 31), odabrane su sljedeće vrijednosti odstupanja debljine zuba:

$$A_{W2,g} = -268\text{ }\mu\text{m}, (f), \quad A_{W1,g} = -468\text{ }\mu\text{m}, (e)$$

$$A_{W2,d} = -402\text{ }\mu\text{m}, (e), \quad A_{W1,d} = -624\text{ }\mu\text{m}, (d)$$

Mjere u  $\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m}=0.001\text{ mm}$ )

Standardni modul $m_n$ [mm]	Promjer diobene kružnice $d$ [mm]	Kvaliteta																							
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
		$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$	$T_i''$	$\Delta T_i''$
1	12	4	2	7	3	11	4	17	5	27	10	43	13	61	17	77	24	97	30	121	39	151	49	194	61
2	16	5	2	7	3	12	5	19	7	29	10	46	14	65	19	82	26	104	32	130	43	162	52	209	65
3	20	6	2	8	4	12	5	20	7	31	11	50	15	70	20	88	27	111	35	139	44	174	56	222	70
4	25	6	3	8	4	13	5	21	8	33	11	53	16	74	21	93	29	118	37	149	47	185	59	236	74
5	32	6	3	9	4	14	6	22	8	35	12	57	17	79	22	99	31	125	39	157	50	196	63	250	79
6	40	6	3	9	4	15	6	24	9	37	12	59	17	83	24	105	33	133	41	166	53	207	66	264	83
7	50	6	3	10	5	16	6	25	9	39	13	62	18	89	25	110	35	140	44	175	56	219	70	278	89
8	63	7	3	10	5	16	7	26	10	41	13	65	19	92	26	116	36	147	46	184	59	230	73	292	92
9	80	7	3	11	5	17	7	27	10	43	14	69	20	97	27	121	38	154	48	193	61	241	77	306	97
10	100	7	4	11	5	18	7	28	11	45	15	72	21	101	29	127	40	161	50	202	64	252	81	320	101
11	125	8	4	12	5	19	8	30	11	47	16	75	22	106	30	133	42	168	53	211	67	263	84	334	106
12	160	8	4	12	5	20	8	31	11	49	16	79	23	110	31	139	44	175	55	220	70	274	89	348	110
13	200	8	4	13	6	20	8	32	12	51	18	82	24	115	32	144	45	182	57	229	72	286	91	362	115
14	250	8	4	13	6	21	8	34	12	53	17	85	25	119	34	149	47	189	59	239	75	297	95	376	119
15	315	9	4	14	6	22	9	35	13	55	17	89	26	124	35	155	49	197	62	247	79	309	99	390	124
16	400	9	5	14	7	23	9	36	13	57	18	91	26	129	36	161	51	204	64	256	81	319	102	404	129
17	500	9	5	15	7	24	9	37	14	59	19	94	27	133	37	166	53	211	66	265	84	330	105	418	133
18	630	10	5	15	7	24	10	39	14	61	19	96	29	137	39	172	54	219	69	274	86	342	109	432	137
19	800	10	5	16	7	25	10	40	15	63	20	101	29	142	40	177	56	225	70	283	89	353	112	446	142
20	1000	10	5	16	7	26	10	41	15	65	20	104	30	146	41	183	58	232	73	292	92	364	116	460	146
		11	5	17	8	27	11	42	15	67	21	107	31	151	42	189	60	239	75	301	95	375	120	474	151
		11	6	17	8	28	11	44	16	69	21	110	32	155	44	194	62	246	77	310	99	386	123	488	155
		11	6	18	8	28	11	45	16	71	22	114	33	160	45	200	63	253	80	319	100	398	127	502	160
		12	6	19	9	29	12	46	17	73	22	117	34	164	46	206	65	260	82	328	103	409	130	516	164
		12	6	19	9	30	12	47	17	75	23	120	35	169	47	211	67	268	84	337	106	421	134	530	169
		12	6	19	9	31	12	49	18	77	24	123	35	173	49	217	89	275	86	346	109	432	137	544	173
		13	6	20	9	32	13	50	18	79	24	126	36	179	50	222	91	282	88	355	112	443	141	558	177
		13	6	20	9	32	13	51	19	81	25	130	37	182	51	228	92	289	91	364	114	455	144	572	182
		13	7	21	9	33	13	52	19	83	25	133	39	187	52	233	94	296	93	373	117	466	148	586	187
		14	7	21	10	34	14	54	20	85	26	136	39	191	54	239	96	303	95	382	120	477	152	600	191
		14	7	22	10	35	14	55	20	87	26	139	40	196	55	245	99	310	97	391	123	488	155	614	196

Razlomljene vrijednosti standardnog modula zaokružuju se na principu:  
od 0,5 do 149 — 1  
od 15 do 249 — 2  
itd.

Primjeri:  $m_n = 5\text{ mm}$ ,  $d = 100\text{ mm}$ , kvaliteta 5,  $T_i'' = 19\mu\text{m}$ ,  $\Delta T_i'' = 13\mu\text{m}$   
 $m_n = 5\text{ mm}$ ,  $d = 480\text{ mm}$ , kvaliteta 5,  $T_i'' = 46\mu\text{m}$ ,  $\Delta T_i'' = 15\mu\text{m}$   
 $m_n = 10\text{ mm}$ ,  $d = 250\text{ mm}$ , kvaliteta 8,  $T_i'' = 49\mu\text{m}$ ,  $\Delta T_i'' = 47\mu\text{m}$   
 $m_n = 10\text{ mm}$ ,  $d = 1000\text{ mm}$ , kvaliteta 8,  $T_i'' = 172\mu\text{m}$ ,  $\Delta T_i'' = 54\mu\text{m}$

Slika 32. Vrijednosti dozvoljenih odstupanja kod radialne kontrole sprežanjem ( $T''_i$ ) i dozvoljenog skoka ovog odstupanja ( $\Delta T''_i$ ) u ovisnosti o modulu, promjeru diobene kružnice i kvaliteti izrade zupčanika [24]

Izbor dozvoljenih odstupanja  $T''_{i2,1}$  za  $m_{n21} = 20\text{ mm}$ ,  $d_1 = 2440\text{ mm}$ ,  $d_2 = 480\text{ mm}$  i kvalitetu zupčanika 9 (odabrano), prema [24], str 113 (slika 32), odabrane su slijedeće vrijednosti:

$$T''_{i2} = 268\mu\text{m}, \quad T''_{i1} = 310\mu\text{m}$$

Da bi se izbjeglo zaglavljivanje zuba o zub zupčanika u zavatu mora biti ispunjen uvjet:

$$j_{\min 21} > 2 \cdot (T''_{i2} + T''_{i1}) \cdot \tan \alpha_{w21} = 2 \cdot (268 + 310) \cdot \tan 20^\circ = 421\mu\text{m} \quad (107)$$



Kontrola:

$$j_{\min 21} = -\frac{(A_{W2,g} + A_{W1,g})}{\cos \alpha_{21}} + 2 \cdot A_{a,d} \cdot \tan \alpha_{w21} = -\frac{(-268-468)}{\cos 20^\circ} + 2 \cdot (-115) \cdot \tan 20^\circ = 699 \mu\text{m} > j_{\min 21} = 421 \mu\text{m} \quad (108)$$

$$j_{\max 21} = -\frac{(A_{W2,d} + A_{W1,d})}{\cos \alpha_{21}} + 2 \cdot A_{a,g} \cdot \tan \alpha_{w21} = -\frac{(-402-624)}{\cos 20^\circ} + 2 \cdot 115 \cdot \tan 20^\circ = 1175 \mu\text{m} > j_{\min 21} = 421 \mu\text{m} \quad (109)$$

### 3.7.2. Par $z_4$ - $z_3$

Određivanje nazivne mjere preko nekoliko zubi za kontrolu graničnih odstupanja (tolerancije):

Mjerni broj zubi nazivne izmjere zupčanika  $z_3$ :

$$\tan \alpha_{x3} = \sqrt{(\tan \alpha_{n43})^2 + \frac{4 \cdot (x_3/z_3) \cdot (1+x_3/z_3)}{\cos \alpha_{n43}}} = \sqrt{(\tan 20^\circ)^2 + \frac{4 \cdot (0,1106/90) \cdot (1+0,1106/90)}{\cos 20^\circ}} = 0,37110 \quad (110)$$

$$z_{w3} = \frac{z_3}{\pi} \cdot (\tan \alpha_{x3} - \text{ev } \alpha_{n43}) - \frac{2 \cdot x_3 \cdot \tan \alpha_{n43}}{\pi} = \frac{90}{\pi} \cdot (0,3711 - \text{ev } 20^\circ) - \frac{2 \cdot 0,1106 \cdot \tan 20^\circ}{\pi} = \frac{90}{\pi} \cdot (0,3711 - 0,0149044) - \frac{2 \cdot 0,1106 \cdot 0,36397}{\pi} = 10,68 = 11 \quad (111)$$

Nazivna mjera preko nekoliko zubi za zupčanik  $z_3$ :

$$W_3 = m_{n43} \cdot \cos \alpha_{n43} \cdot (\pi \cdot (z_{w3} - 0,5) + z_3 \cdot \text{ev } \alpha_{n43} + 2 \cdot x_3 \cdot \tan \alpha_{n43}) = 16 \cdot \cos 20^\circ \cdot (\pi \cdot (11 - 0,5) + 90 \cdot \text{ev } 20^\circ + 2 \cdot 0,1106 \cdot \tan 20^\circ) = 517,337 \text{ mm} \quad (112)$$

Mjerni broj zubi nazivne izmjere zupčanika  $z_4$ :

$$\tan \alpha_{x4} = \sqrt{(\tan \alpha_{n43})^2 + \frac{4 \cdot (x_4/z_4) \cdot (1+x_4/z_4)}{\cos \alpha_{n43}}} = \sqrt{(\tan 20^\circ)^2 + \frac{4 \cdot (0,22/30) \cdot (1+0,22/30)}{\cos 20^\circ}} = 0,40487 \quad (113)$$

$$z_{w4} = \frac{z_4}{\pi} \cdot (\tan \alpha_{x4} - \text{ev } \alpha_{n43}) - \frac{2 \cdot x_4 \cdot \tan \alpha_{n43}}{\pi} = \frac{30}{\pi} \cdot (\tan 20^\circ - \text{ev } 20^\circ) - \frac{2 \cdot 0,22 \cdot \tan 20^\circ}{\pi} = \frac{30}{\pi} \cdot (0,36397 - 0,0149044) - \frac{2 \cdot 0,22 \cdot 0,36397}{\pi} = 4,173 = 5 \quad (114)$$

Nazivna mjera preko nekoliko zubi za zupčanik  $z_4$ :

$$W_4 = m_{n43} \cdot \cos \alpha_{n43} \cdot (\pi \cdot (z_{w4} - 0,5) + z_4 \cdot \text{ev } \alpha_{n43} + 2 \cdot x_4 \cdot \tan \alpha_{n43}) = 16 \cdot \cos 20^\circ \cdot (\pi \cdot (5 - 0,5) + 30 \cdot \text{ev } 20^\circ + 2 \cdot 0,22 \cdot \tan 20^\circ) = 221,684 \text{ mm} \quad (115)$$

Izbor kružne zračnosti, prema [24], str. 111 (slika 29):

$$j_{\max 43} = 650 \mu\text{m} \quad (116)$$

$$j_{\min 43} = 450 \mu\text{m} \quad (117)$$

Vrijednost graničnog odstupanja razmaka osi za kvalitetu zupčanika 9 i razmak osi  $a_{w43} = 980 \text{ mm}$ , prema [24], str. 112 (slika 30):

$$A_{a,g,d} = \pm 115 \mu\text{m} \quad (118)$$

Granična odstupanja debljine zubi  $A_{W3,4}$  uz odabranu kružnu zračnost  $j_{\max 43}$  i  $j_{\min 43}$  i granična odstupanja razmaka osi vratila  $A_a$ :

$$-(A_{W4,d} + A_{W3,d}) = j_{\max 43} \cdot \cos \alpha_{n43} - 2 \cdot A_{a,g} \cdot \sin \alpha_{nw43} = 650 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot 115 \cdot \sin 20,7965^\circ = 521,02 \mu\text{m} \quad (119)$$

$$-(A_{W4,g} + A_{W3,g}) = j_{\min 43} \cdot \cos \alpha_{n43} - 2 \cdot A_{a,d} \cdot \sin \alpha_{nw43} = 450 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot (-115) \cdot \sin 20,7965^\circ = 496,8 \mu\text{m} \quad (120)$$

Za  $m_{n43} = 16 \text{ mm}$ ,  $d_{t3} = 1462,2 \text{ mm}$ ,  $d_{t4} = 487,4 \text{ mm}$  i kvalitetu zupčanika 9 (odabrano), prema [24], str 110 (slika 31), odabrane su slijedeće vrijednosti odstupanja debljine zuba:

$$A_{W4,g} = -248 \mu\text{m}, (f), \quad A_{W3,g} = -414 \mu\text{m}, (e)$$

$$A_{W4,d} = -372 \mu\text{m}, (e), \quad A_{W3,d} = -552 \mu\text{m}, (d)$$

Izbor dozvoljenih odstupanja  $T''_{i4,3}$  za  $m_{n43} = 16 \text{ mm}$ ,  $d_{t3} = 1462,2 \text{ mm}$ ,  $d_{t4} = 487,4 \text{ mm}$  i kvalitetu zupčanika 9 (odabrano), prema [24], str 113 (slika 32), odabrane su slijedeće vrijednosti:

$$T''_{i4} = 246 \mu\text{m}, \quad T''_{i3} = 275 \mu\text{m}$$

Da bi se izbjeglo zaglavljivanje zuba o zub zupčanika u zavatu mora biti ispunjen uvjet:

$$j_{\min 43} > 2 \cdot (T''_{i4} + T''_{i3}) \cdot \tan \alpha_{nw43} = 2 \cdot (268 + 310) \cdot \tan 20,7965^\circ = 396 \mu\text{m} \quad (121)$$

Kontrola:

$$j_{\min 43} = -\frac{(A_{W4,g} + A_{W3,g})}{\cos \alpha_{n43}} + 2 \cdot A_{a,d} \cdot \tan \alpha_{nw43} =$$

$$-\frac{(-248-414)}{\cos 20^\circ} + 2 \cdot (-115) \cdot \tan 20,7965^\circ = 628 \mu\text{m} > j_{\min 43} = 396 \mu\text{m} \quad (122)$$

$$j_{\max 43} = -\frac{(A_{W4,d} + A_{W3,d})}{\cos \alpha_{43}} + 2 \cdot A_{a,g} \cdot \tan \alpha_{nw43} = -\frac{(-372-552)}{\cos 20^\circ} + 2 \cdot 115 \cdot \tan 20,7965^\circ =$$

$$1086 \mu\text{m} > j_{\min 43} = 396 \mu\text{m} \quad (123)$$

### 3.7.3. Par $z_6$ - $z_5$

Određivanje nazivne mjere preko nekoliko zubi za kontrolu graničnih odstupanja (tolerancije):

Mjerni broj zubi nazivne izmjere zupčanika  $z_5$ :

$$\tan \alpha_{x5} = \sqrt{(\tan \alpha_{n65})^2 + \frac{4 \cdot (x_5/z_5) \cdot (1+x_5/z_5)}{\cos \alpha_{n65}}} = \sqrt{(\tan 20^\circ)^2 + \frac{4 \cdot (0,0693/55) \cdot (1+0,0693/55)}{\cos 20^\circ}} =$$

$$0,37127 \quad (124)$$

$$z_{w5} = \frac{z_5}{\pi} \cdot (\tan \alpha_{x5} - \text{ev } \alpha_{n65}) - \frac{2 \cdot x_5 \cdot \tan \alpha_{n65}}{\pi} = \frac{55}{\pi} \cdot (0,37127 - \text{ev } 20^\circ) - \frac{2 \cdot 0,0693 \cdot \tan 20^\circ}{\pi} = \frac{55}{\pi} \cdot$$

$$(0,37127 - 0,0149044) - \frac{2 \cdot 0,0693 \cdot 0,36397}{\pi} = 6,72 = 7 \quad (125)$$

Nazivna mjera preko nekoliko zubi za zupčanik  $z_5$ :

$$W_5 = m_{n65} \cdot \cos \alpha_{n65} \cdot (\pi \cdot (z_{w5} - 0,5) + z_5 \cdot \text{ev } \alpha_{n65} + 2 \cdot x_5 \cdot \tan \alpha_{n65}) = 16 \cdot \cos 20^\circ \cdot$$

$$(\pi \cdot (7 - 0,5) + 55 \cdot \text{ev } 20^\circ + 2 \cdot 0,0693 \cdot \tan 20^\circ) = 320,105 \text{ mm} \quad (126)$$

Mjerni broj zubi nazivne izmjere zupčanika  $z_6$ :

$$\tan \alpha_{x6} = \sqrt{(\tan \alpha_{n65})^2 + \frac{4 \cdot (x_6/z_6) \cdot (1+x_6/z_6)}{\cos \alpha_{n65}}} = \sqrt{(\tan 20^\circ)^2 + \frac{4 \cdot (0/14) \cdot (1+0/14)}{\cos 20^\circ}} = 0,36397 \quad (127)$$

$$z_{w6} = \frac{z_6}{\pi} \cdot (\tan \alpha_{x6} - \text{ev } \alpha_{n65}) - \frac{2 \cdot x_6 \cdot \tan \alpha_{n65}}{\pi} = \frac{14}{\pi} \cdot (\tan 20^\circ - \text{ev } 20^\circ) - \frac{2 \cdot 0 \cdot \tan 20^\circ}{\pi} = \frac{14}{\pi} \cdot$$

$$(0,36397 - 0,0149044) - \frac{2 \cdot 0 \cdot 0,36397}{\pi} = 2,056 = 3 \quad (128)$$

Nazivna mjera preko nekoliko zubi za zupčanik  $z_6$ :

$$W_6 = m_{n65} \cdot \cos \alpha_{n65} \cdot (\pi \cdot (z_{w6} - 0,5) + z_6 \cdot \text{ev } \alpha_{n65} + 2 \cdot x_6 \cdot \tan \alpha_{n65}) = 16 \cdot \cos 20^\circ \cdot$$

$$(\pi \cdot (3 - 0,5) + 14 \cdot \text{ev } 20^\circ + 2 \cdot 0 \cdot \tan 20^\circ) = 121,222 \text{ mm} \quad (129)$$

Izbor kružne zračnosti, prema [24], str. 111 (slika 29):

$$j_{\max 65} = 650 \text{ } \mu\text{m} \quad (130)$$

$$j_{\min 65} = 450 \text{ } \mu\text{m} \quad (131)$$

Vrijednost graničnog odstupanja razmaka osi za kvalitetu zupčanika 9 i razmak osi  $a_{w65} = 570 \text{ mm}$ , prema [24], str. 112 (slika 30):

$$A_{a,g,d} = \pm 115 \text{ } \mu\text{m} \quad (132)$$

Granična odstupanja debljine zubi  $A_{W5,6}$  uz odabranu kružnu zračnost  $j_{\max 65}$  i  $j_{\min 65}$  i granična odstupanja razmaka osi vratila  $A_a$ :

$$-(A_{W6,d} + A_{W5,d}) = j_{\max 65} \cdot \cos \alpha_{n65} - 2 \cdot A_{a,g} \cdot \sin \alpha_{nw65} = 650 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot 115 \cdot \sin 20,2865^\circ = 533,4 \text{ } \mu\text{m} \quad (133)$$

$$-(A_{W4,g} + A_{W3,g}) = j_{\min 43} \cdot \cos \alpha_{n43} - 2 \cdot A_{a,d} \cdot \sin \alpha_{nw43} = 450 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot (-115) \cdot \sin 20,2865^\circ = 469,5 \text{ } \mu\text{m} \quad (134)$$

Za  $m_{n43} = 16 \text{ mm}$ ,  $d_{t5} = 906,9 \text{ mm}$ ,  $d_{t6} = 230,9 \text{ mm}$  i kvalitetu zupčanika 9 (odabrano), prema [24], str 110 (slika 31), odabrane su slijedeće vrijednosti odstupanja debljine zuba:

$$A_{W6,g} = -232 \text{ } \mu\text{m}, \text{ (f)}, \quad A_{W5,g} = -390 \text{ } \mu\text{m}, \text{ (e)}$$

$$A_{W6,d} = -348 \text{ } \mu\text{m}, \text{ (e)}, \quad A_{W5,d} = -520 \text{ } \mu\text{m}, \text{ (d)}$$

Izbor dozvoljenih odstupanja  $T''_{i4,3}$  za  $m_{n65} = 16 \text{ mm}$ ,  $d_{t5} = 906,9 \text{ mm}$ ,  $d_{t6} = 230,9 \text{ mm}$  i kvalitetu zupčanika 9 (odabrano), prema [24], str 113 (slika 32), odabrane su slijedeće vrijednosti:

$$T''_{i6} = 232 \text{ } \mu\text{m}, \quad T''_{i5} = 260 \text{ } \mu\text{m}$$

Da bi se izbjeglo zaglavljivanje zuba o zub zupčanika u zavatu mora biti ispunjen uvjet:

$$j_{\min 43} > 2 \cdot (T''_{i4} + T''_{i3}) \cdot \tan \alpha_{nw43} = 2 \cdot (232 + 260) \cdot \tan 20,2865^\circ = 364 \text{ } \mu\text{m} \quad (135)$$

Kontrola:

$$j_{\min 65} = -\frac{(A_{W6,g} + A_{W5,g})}{\cos \alpha_{n65}} + 2 \cdot A_{a,d} \cdot \tan \alpha_{nw65} = -\frac{(-232-390)}{\cos 20^\circ} + 2 \cdot (-115) \cdot \tan 20,2865^\circ = 617 \mu\text{m} > j_{\min 65} = 364 \mu\text{m} \quad (136)$$

$$j_{\max 65} = -\frac{(A_{W6,d} + A_{W5,d})}{\cos \alpha_{65}} + 2 \cdot A_{a,g} \cdot \tan \alpha_{nw65} = -\frac{(-348-520)}{\cos 20^\circ} + 2 \cdot 115 \cdot \tan 20,2865^\circ = 1017 \mu\text{m} > j_{\min 65} = 364 \mu\text{m} \quad (137)$$

### 3.8. Kontrolni proračun zupčanika

#### 3.8.1. Sile na pojedinim zupčaničkim parovima

Tangencijalna sila zupčaničkog para  $z_2-z_1$ :  $F_{wt21} = \frac{2 \cdot T_{z2} \cdot 1000}{d_{w2}} = \frac{2 \cdot 66111 \cdot 1000}{480} = 275460 \text{ N}$

Radijalna sila zupčaničkog para  $z_2-z_1$ :  $F_{wr21} = F_{wt21} \cdot \tan \alpha_{w21} = 275460 \cdot \tan 20^\circ = 100259 \text{ N}$

Tangencijalna sila zupčaničkog para  $z_4-z_3$ :  $F_{wt43} = \frac{2 \cdot T_{z4} \cdot 1000}{d_{tw4}} = \frac{2 \cdot 22037 \cdot 1000}{490} = 89946 \text{ N}$

Radijalna sila zupčaničkog para  $z_4-z_3$ :  $F_{wr43} = F_{wt43} \cdot \tan \alpha_{tw43} = 89946 \cdot \tan 21,0893^\circ = 34688 \text{ N}$

Aksijalna sila zupčaničkog para  $z_4-z_3$ :  $F_{wa43} = F_{wt43} \cdot \tan \beta_1 = 89946 \cdot \tan 10^\circ = 15860 \text{ N}$

Tangencijalna sila zupčaničkog para  $z_6-z_5$ :  $F_{wt65} = \frac{2 \cdot T_{izl,max} \cdot 1000}{d_{tw6}} = \frac{2 \cdot 16828 \cdot 1000}{231,304} = 145506 \text{ N}$

Radijalna sila zupčaničkog para  $z_6-z_5$ :  $F_{wr65} = F_{wt65} \cdot \tan \alpha_{tw65} = 145506 \cdot \tan 20,8548^\circ = 55432 \text{ N}$

Aksijalna sila zupčaničkog para  $z_6-z_5$ :  $F_{wa65} = F_{wt65} \cdot \tan \beta_2 = 145506 \cdot \tan 14^\circ = 36279 \text{ N}$

Sile na ručici:

Aksijalna sila na ručici:  $F_{aruc} = 3 \cdot F_{wa43} = 3 \cdot 15860 = 47580 \text{ N}$

Radijalna sila na ručici:  $F_{rruc} = 3 \cdot F_{wr21} - 3 \cdot F_{wr43} = 3 \cdot 100259 - 3 \cdot 34688 = 196714 \text{ N}$

### 3.8.2. Kontrola zupčanika $z_2$ (para $z_2$ - $z_1$ ) u odnosu na dozvoljeno naprezanje u korijenu

Širina zupčanika:

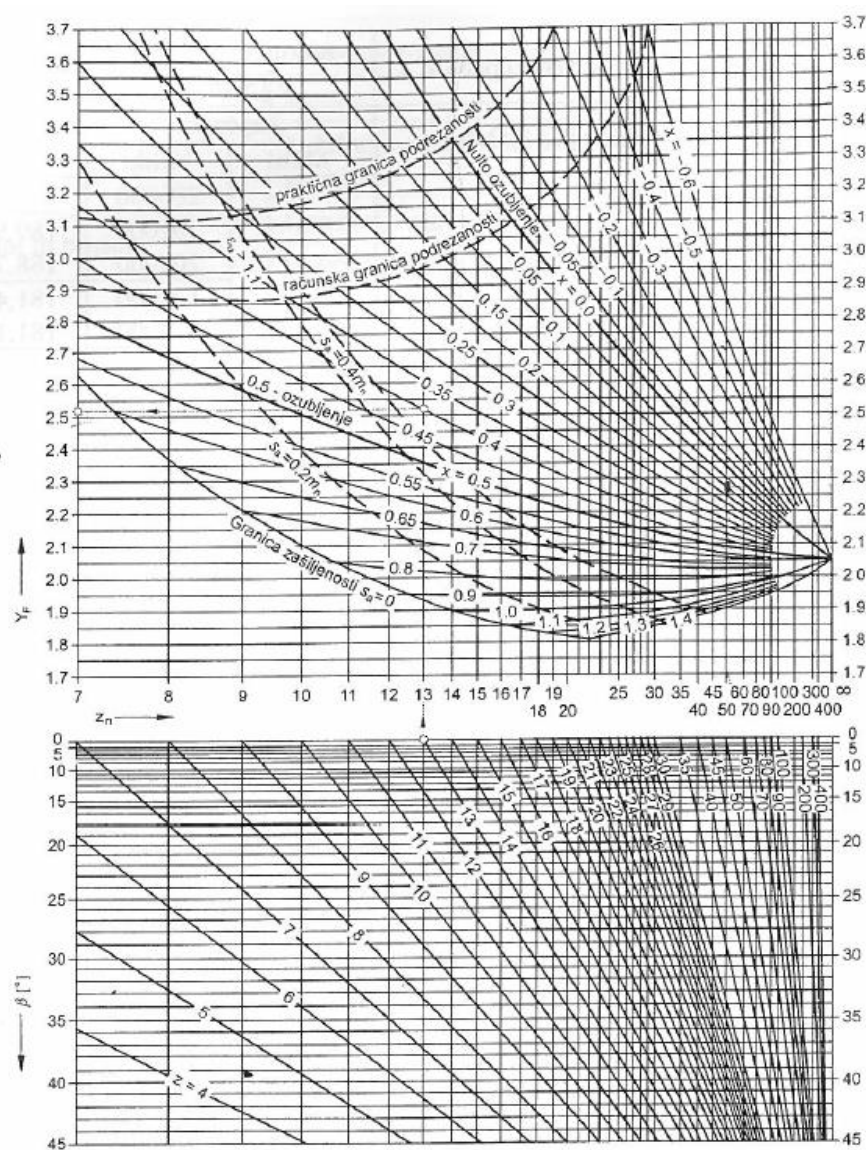
$$b_{21} = \lambda \cdot m_{n21} = 25 \cdot 20 = 500 \text{ mm} \quad (138)$$

Naprezanje u korijenu zuba:  $\sigma_{F2} = \frac{F_{wt21}}{b_{21} \cdot m_{n21}} \cdot Y_{F2} \cdot Y_{\varepsilon} \cdot K_{F\alpha2} \cdot K_{F\gamma2} \cdot K_v \cdot K_I$

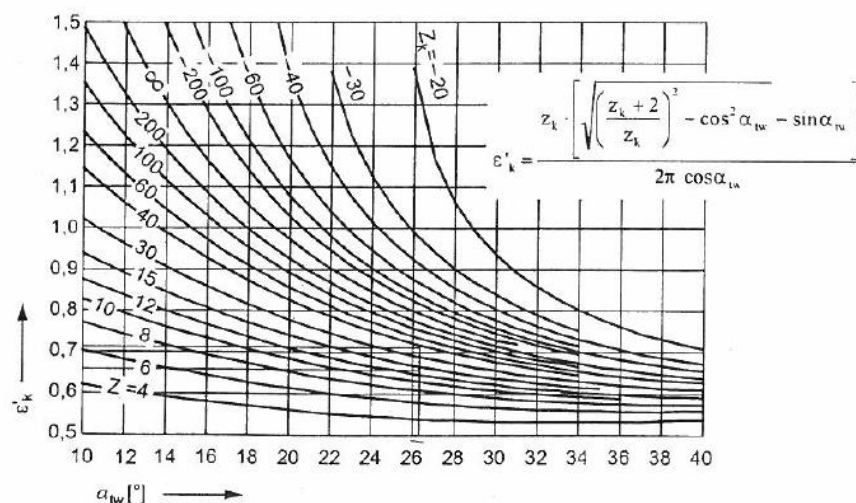
Gdje je:

Faktor oblika prema [24], str. 152, kao  $f(z_2 = 24, x_2 = 0, \beta = 0)$ , slika 33:

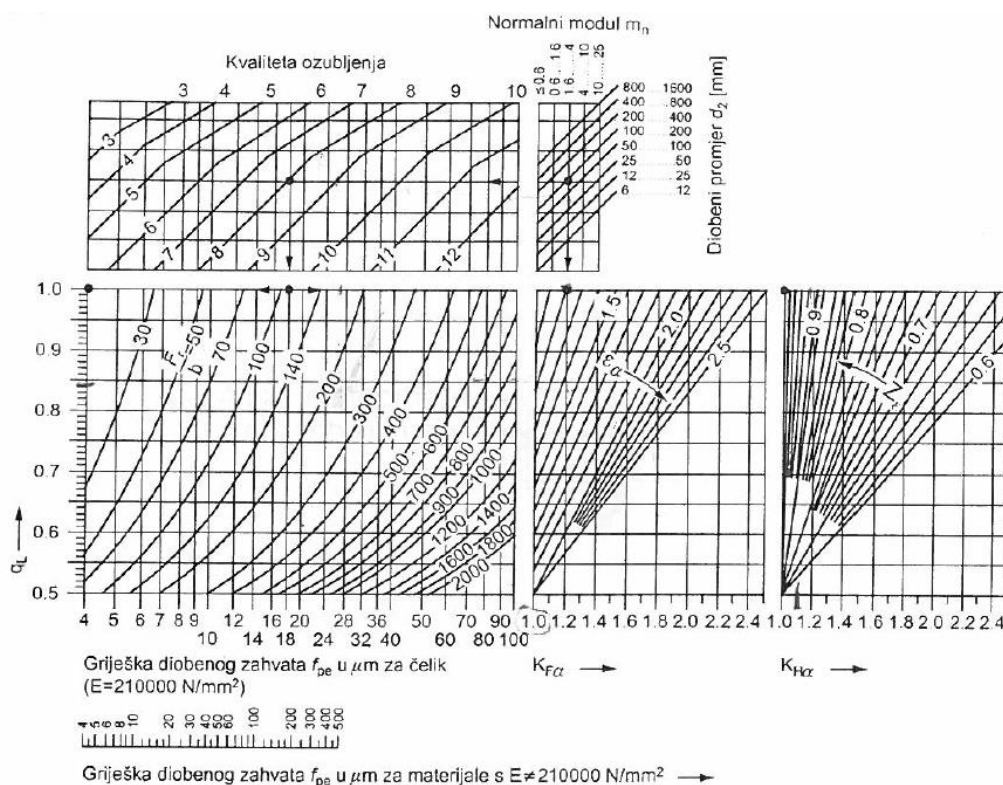
$$Y_{F2} = 2,75 \quad (139)$$



Slika 33. Faktor oblika  $Y_F$  [25]



Slika 34. Značajka prekrivanja pojedinačnog zahvata  $\varepsilon'_k$  ( $\alpha_w = \alpha_{tw}$ ) [25]



Slika 35. Pomoćni faktor raspodjele  $q_L$  i faktori raspodjele opterećenja  $K_{F\alpha}$  i  $K_{H\alpha}$  [25]

Faktor učešća opterećenja, prema [24], str 154:

$$z_{k2} = \frac{2 \cdot d_{w2}}{d_{a2} - d_{w2}} = \frac{2 \cdot 480}{520 - 480} = 24 \quad (140)$$

$$\varepsilon'_{k2} = f(\alpha_{w21} = 20^\circ, z_{k2} = 24) = 0,8, \text{ prema [25], str. 71 (slika 34)}$$

$$\varepsilon_{k2} = \varepsilon'_{k2} \cdot \frac{z_2}{z_{k2}} = 0,8 \cdot \frac{24}{24} = 0,8 \quad (141)$$

$$z_{k1} = \frac{2 \cdot d_{w1}}{d_{a1} - d_{w1}} = \frac{2 \cdot 2440}{2400 - 2440} = -122 \quad (142)$$

$$\varepsilon'_{k1} = f(\alpha_{w21} = 20^\circ, z_{k1} = -122) = 1,1, \text{ prema [25], str. 71 (slika 34)}$$

$$\varepsilon_{k1} = \varepsilon'_{k1} \cdot \frac{z_1}{z_{k1}} = 1,1 \cdot \frac{-122}{-122} = 1,1 \quad (143)$$

$$\varepsilon_{\alpha2} = \varepsilon_{k1} + \varepsilon_{k2} = 1,1 + 0,8 = 1,9 \quad (144)$$

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{1,9} = 0,53 \quad (145)$$

Korektivni faktor  $q_{L2}$ ,  $f(d_{w2} = 480 \text{ mm}, m_{n21}$ , kvaliteta 9,  $F_{wt21}/b_{21} = 551$ ), prema [25], str. 73 (slika 35):

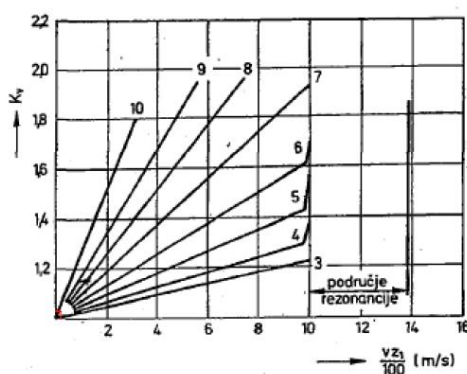
$$q_{L2} = 0,75 \quad (146)$$

Faktor raspodjele opterećenja, prema [24], str. 159 (slika 35):

$$K_{F\alpha2} = 1,4 \quad (147)$$

Faktor udara za turbostroj s jakim udarima, prema [24], str. 130:

$$K_I = 1,75 \quad (148)$$

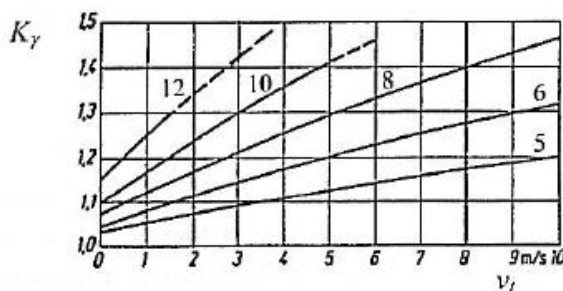


**Slika 36.** Vrijednosti faktora unutrašnjih dinamičkih sila  $K_v$  za čelnike s ravnim zubima za ISO kvalitetu ozubljenja 3 do 10 [24]



Faktor unutrašnjih dinamičkih sila za čelnike s ravnim zubima, kvalitetu 9 i  $(v \cdot z_2)/100 = 3,3$ , prema [24], str. 135 (slika 36):

$$K_V = 1,1 \quad (149)$$



**Slika 37.** Približne vrijednosti faktora  $K_V$  za planetarne prijenosnike u zavisnosti od obodnih brzina i kvalitete ozubljenja, prema DIN 3990 [5]

Faktor nejednolike raspodjele opterećenja, prema [5], str. 152 (slike 37):

$$K_{FV2} = 1,25 \quad (150)$$

pa je naprezanje u korijenu zuba:

$$\sigma_{F2} = \frac{275460}{500 \cdot 20} \cdot 2,75 \cdot 0,53 \cdot 1,4 \cdot 1,25 \cdot 1,1 \cdot 1,75 = 134,31 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (151)$$

Za 31CrMoV9 vrijedi:

$$\sigma_{FP2} = \frac{\sigma_{Flim}}{S_{F2}} = \frac{445}{2,5} = 178 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (152)$$

gdje je  $S_{F2} = 1,5 \dots (3,5)$  potreban koeficijent sigurnosti loma zuba, prema [25], str. 70 (slika 38), pa je odabrano  $S_{F2} = 2,5$ . Dakle dopušteno naprezanje je većeg iznosa od najvećeg naprezanja u korijenu zuba.

Sigurnost protiv:	Trajni pogon TP=100%	Interminirajući TP≠100% (Vremenski pogon)
Loma zuba $S_F$	1,5 ... (3,5)	1,3 ... (2,0)
Ljuštenja (pitting) bokova $S_H$	1,3 ... (3,0)	1,0 ... (1,5)

**Slika 38.** Potrebni koeficijenti sigurnosti ( $S_F$  i  $S_H$ ) [25]

### 3.8.3. Kontrola zupčanika $z_2$ (para $z_2$ - $z_1$ ) u odnosu a dozvoljenu čvrstoću boka

$$\text{Hertzov pritisak: } \sigma_H = Z_M \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{u_{21}+1}{u_{21}} \cdot \frac{F_{wt21}}{b_{21} \cdot d_1} \cdot K_{H\alpha 2} \cdot K_{H\gamma 2} \cdot K_V \cdot K_I}$$

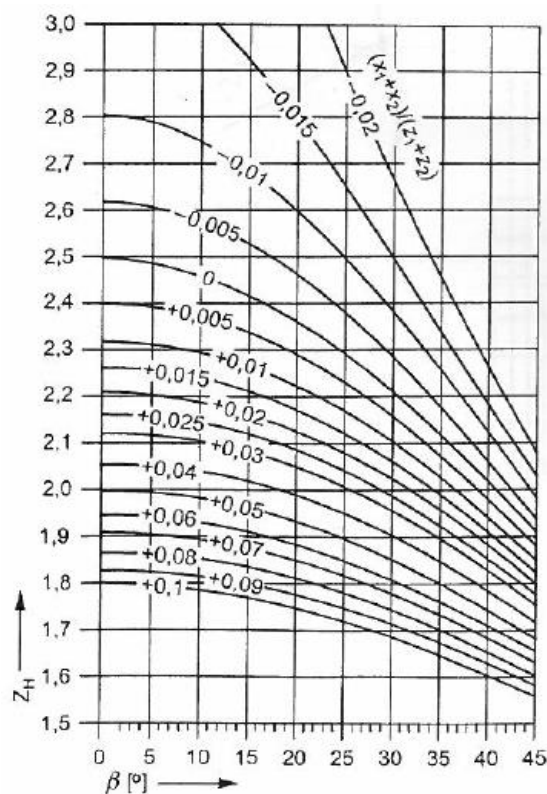
Mali zupčanik		Veliki zupčanik		Modul elastičnosti E [N/mm <sup>2</sup> ]		Z <sub>M</sub> [√N/mm <sup>2</sup> ]
Materijal	Oznaka	Materijal	Oznaka	Zupčanik		
				Mali	Veliki	
Čelik	Č	Čelik	Č	206000	206000	189,84
		Čelični lijev	ČL 0645		202000	189,9
			ČL 0545		201000	188,7
			Nodularni (sferni) lijev		NL 50	173000
		NL 42			172000	181,1
		Kositrena bronca, lijevana	PCuSn14		103000	155
		Kositrena bronca	CuSn8		113000	159,8
		Sivi lijev, lamelarni	SL 25		126000	165,4
			SL 20		118000	162
Duroplast	-	7850 <sup>1</sup>	56,4 <sup>1</sup>			
Čelični lijev	ČL 0645	Čel. lijev	ČL 0545	202000	201000	187,8
		Nod. lijev	NL 50		173000	180,5
		Sivi lijev	SL 20		118000	161,4
Nodularni (sferni) lijev	NL 50 <sup>1</sup>	Nod. lijev	NL 42	173000	172000	173,7
		Sivi lijev	SL 20		118000	156,6
Sivi lijev	SL 25	Sivi lijev	SL 20	126000	118000	146
	SL 20			118000		143,7

<sup>1</sup> srednje vrijednosti

**Slika 39. Faktor materijala Z<sub>M</sub> (Y<sub>w</sub>) [25]**

Faktor materijala, dodir čelik-čelik, prema [25], str. 71 (slika 39):

$$Z_M = 189,9 \sqrt{\text{N/mm}^2} \quad (153)$$



**Slika 40. Faktor oblika boka  $Z_H$ , prema HRN M.C1.016 [25]**

Faktor oblika boka, prema [25], str. 73 (slika 40),  
 $f((x_2 + x_1)/(z_2 + z_1)) = (0 + 0)/(24 + 122), \beta = 0$ :

$$Z_H = 2,5 \quad (154)$$

Faktor prekrivanja, prema [24], str. 180:

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_{\alpha 2}}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1,9}{3}} = 0,837 \quad (155)$$

Faktor raspodjele opterećenja, prema [24], str. 159 (slika 35):

$$K_{H\alpha 2} = 1,2 \quad (156)$$

Faktor udara za turbostroj s jakim udarima, prema [24], str. 130:

$$K_I = 1,75 \quad (157)$$

Faktor unutrašnjih dinamičkih sila za čelnike s ravnim zubima, kvalitetu 9 i  $(v \cdot z_2)/100 = 3,3$ , prema [24], str. 135 (slika 36):

$$K_v = 1,1 \quad (158)$$

Faktor nejednolike raspodjele opterećenja, prema [5], str. 152 (slika 37):

$$K_{HY2} = 1,25 \quad (159)$$

pa Hertzovo naprezanje iznosi:

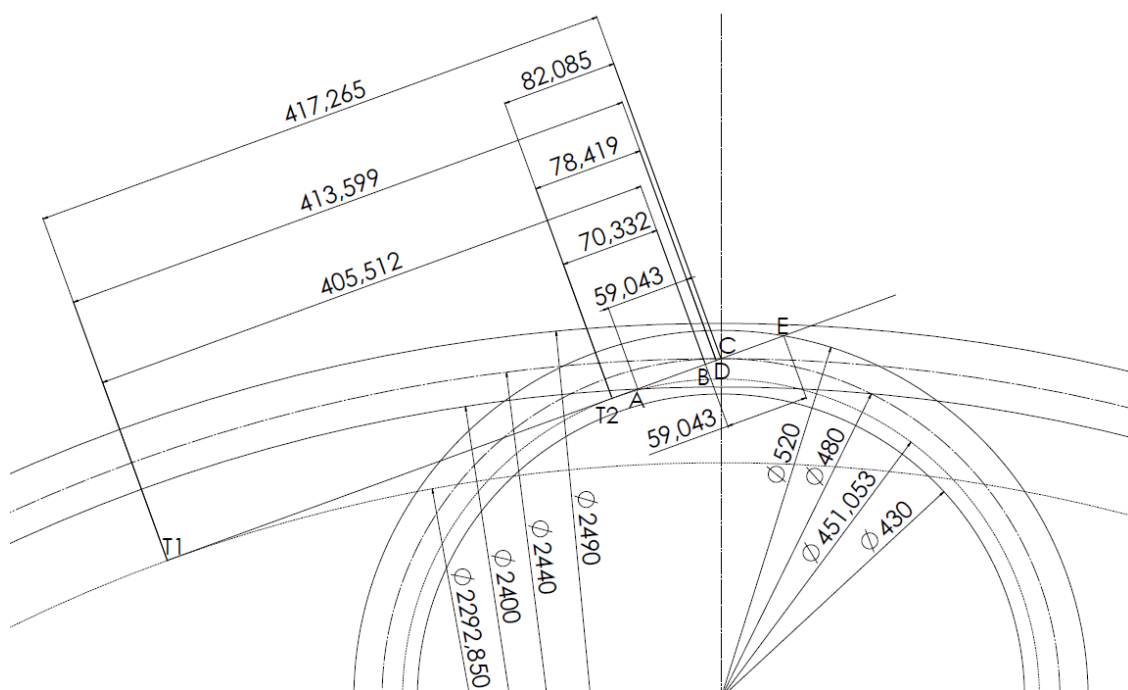
$$\sigma_H = 189,9 \cdot 2,5 \cdot 0,837 \cdot \sqrt{\frac{\frac{122}{24} + 1}{\frac{122}{24}} \cdot \frac{275460}{500 \cdot 2440} \cdot 1,2 \cdot 1,25 \cdot 1,1 \cdot 1,75} = 791,03 \frac{N}{mm^2} \quad (160)$$

Za 31CrMoV9 vrijedi:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} = \frac{1400}{791,03} = 1,77 \quad (161)$$

Postojeća sigurnost je u granicama potrebnih koeficijenata sigurnosti ljuštenja (pitting) bokova  $S_H = 1,3 \dots (3,0)$ , prema [25], str. 70 (slika 38).

### 3.8.3.1. Kontrola u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka u pojedinim točkama zahvata



Slika 41.

Skica zupčanika  $z_1$  i  $z_2$  u zahvatu

Osnovni korak profila sa skice zupčanika u zahvatu je izračunat prema izrazu:

$$AD = BE = p_e = m_{n21} \cdot \pi \cdot \cos \alpha_{21} = 20 \cdot \pi \cdot \cos 20^\circ = 59,043 \text{ mm} \quad (162)$$

Sa skice zupčanika u zahvatu rađene u mjerilu 1:1 mogu se očitati slijedeće vrijednosti:

$$T_2C = 82,085 \text{ mm} = \rho_{2c} \quad (163)$$

$$T_1C = 417,265 \text{ mm} = \rho_{1c} \quad (164)$$

$$T_2B = 70,332 \text{ mm} = \rho_{2b} \quad (165)$$

$$T_1B = 405,512 \text{ mm} = \rho_{1b} \quad (166)$$

$$T_1D = 78,419 \text{ mm} = \rho_{1d} \quad (167)$$

$$T_2D = 413,599 \text{ mm} = \rho_{2d} \quad (168)$$

Naprezanje u točki B:

Faktor zahvata u točki B:

$$Z_B = \sqrt{\frac{\rho_{2c} \cdot \rho_{1c}}{\rho_{2b} \cdot \rho_{1b}}} = \sqrt{\frac{82,085 \cdot 417,265}{70,332 \cdot 405,512}} = 1,165 \quad (169)$$

$$\sigma_{HB} = \sigma_H \cdot Z_B = 791,03 \cdot 1,165 = 921,55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (170)$$

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} = \frac{1400}{1,5} = 933,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (171)$$

gdje je faktor sigurnosti  $S_H = 1,5$  odabran. Dakle, zadovoljena je relacija:

$$\sigma_{HB} \leq \sigma_{HP} \quad (172)$$

Naprezanje u točki D:

Faktor zahvata u točki D:

$$Z_D = \sqrt{\frac{\rho_{2c} \cdot \rho_{1c}}{\rho_{2d} \cdot \rho_{1d}}} = \sqrt{\frac{82,085 \cdot 417,265}{413,599 \cdot 78,419}} = 1,092 \quad (173)$$

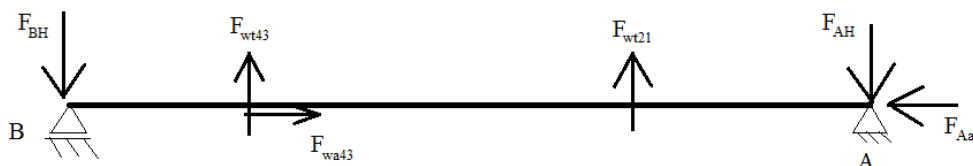
$$\sigma_{HD} = \sigma_H \cdot Z_D = 791,03 \cdot 1,092 = 863,805 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (174)$$

I prilikom zahvata u točki D vrijedi relacija:

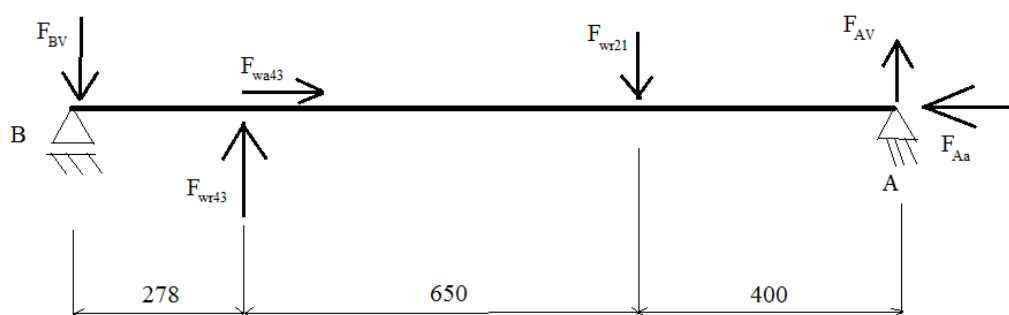
$$\sigma_{HB} \leq \sigma_{HP} \quad (175)$$

### 3.9. Proračun vratila

Horizontalna ravnina



Vertikalna ravnina



Slika 42.

Shematski prikaz djelovanja sila na vratilo

Suma svih sila u aksijalnom smjeru:

$$\sum F_a = F_{Aa} - F_{wa43} = 0 \quad (176)$$

Aksijalna reakcija u ležajnom mjestu A:

$$F_{Aa} = F_{wa43} = 15859,96 \text{ N} \quad (177)$$

Suma radijalnih sila u horizontalnoj ravnini:

$$\sum F_h = -F_{BH} + F_{wt43} + F_{wt21} - F_{AH} = 0 \quad (178)$$

Suma momenata oko točke B u horizontalnoj ravnini:

$$\sum M_{Bh} = F_{wt43} \cdot l_{y2} + F_{wt21} \cdot l_{y5} - F_{AH} \cdot l_{uk} = 0 \quad (179)$$

Radijalna reakcija u ležajnom mjestu A u horizontalnoj ravnini:

$$F_{AH} = \frac{F_{wt43} \cdot l_{y2} + F_{wt21} \cdot l_{y5}}{l_{uk}} = \frac{89946,28 \cdot 278 + 275460,48 \cdot 928}{1328} = 211319,57 \text{ N} \quad (180)$$

Radijalna reakcija u ležajnom mjestu B u horizontalnoj ravnini:

$$F_{BH} = F_{wt43} + F_{wt21} - F_{AH} = 89946,28 + 275460,48 - 211319,57 = 154087,19 \text{ N} \quad (181)$$

Suma radijalnih sila u vertikalnoj ravnini:

$$\sum F_v = -F_{BV} + F_{wr43} - F_{wr21} + F_{AV} = 0 \quad (182)$$

Suma momenata oko točke B u vertikalnoj ravnini:

$$\sum M_{vh} = F_{wr43} \cdot l_{y2} - F_{wr21} \cdot l_{y5} + F_{AV} \cdot l_{uk} = 0 \quad (183)$$

Radijalna reakcija u ležajnom mjestu A u vertikalnoj ravnini:

$$F_{AV} = \frac{F_{wr21} \cdot l_{y5} - F_{wr43} \cdot l_{y2}}{l_{uk}} = \frac{100259,41 \cdot 928 - 34688,15 \cdot 278}{1328} = 62799,27 \text{ N} \quad (184)$$

Radijalna reakcija u ležajnom mjestu B u vertikalnoj ravnini:

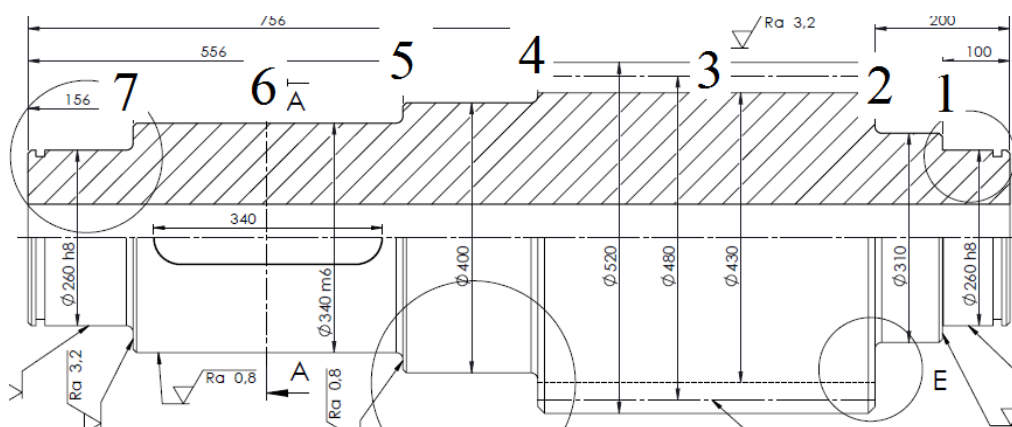
$$F_{BV} = F_{wr43} - F_{wr21} + F_{AV} = 34688,15 - 100259,41 + 62799,27 = -2771,99 \text{ N} \quad (185)$$

$$\sigma_{fDNdop} = 60 \text{ N/mm}^2, [1], \text{ str. 223}$$

Rezultantne radijalne reakcije u A i B:

$$F_A = \sqrt{F_{AH}^2 + F_{AV}^2} = \sqrt{211319,57^2 + 62799,27^2} = 220453,42 \text{ N} \quad (186)$$

$$F_B = \sqrt{F_{BH}^2 + F_{BV}^2} = \sqrt{154087,19^2 + 2771,99^2} = 154112,12 \text{ N} \quad (187)$$



Slika 43. Presjeci na vratilu

Samo savojno (fleksijski) napregnuti presjeci:

Presjek 1:

$$x_1 = 50 \text{ mm} \quad d_{x1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot F_A}{\sigma_{fDNdop}}} \cdot x_1^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 220453,42}{60}} \cdot 50^{1/3} = 33,25 \cdot 50^{1/3} = 122,49 \text{ mm}$$

Presjek 2:

$$x_2 = 150 \text{ mm} \quad d_{x2} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot F_A}{\sigma_{fDNdop}}} \cdot x_1^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 220453,42}{60}} \cdot 150^{1/3} = 33,25 \cdot 150^{1/3} = 176,67 \text{ mm}$$

Presjek 3:

$$x_3 = 400 \text{ mm} \quad d_{x3} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot F_A}{\sigma_{fDNdop}}} \cdot x_1^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 220453,42}{60}} \cdot 400^{1/3} = 33,25 \cdot 400^{1/3} = 244,99 \text{ mm}$$

Presjek 6:

$$y_6 = 278 \text{ mm} \quad d_{y6} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot F_B}{\sigma_{fDNdop}}} \cdot y_6^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 154112,12}{60}} \cdot 278^{1/3} = 29,51 \cdot 278^{1/3} = 192,59 \text{ mm}$$

Presjek 7:

$$y_7 = 78 \text{ mm} \quad d_{y7} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot F_B}{\sigma_{fDNdop}}} \cdot y_7^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 154112,12}{60}} \cdot 78^{1/3} = 29,51 \cdot 78^{1/3} = 126,09 \text{ mm}$$

Presjeci 3, 4, 5 i 6 napregnuti savojno (fleksijski) i uvojno (torzijski):

Moment uvijanja (torzije):

$$T = 198331,5445 \text{ Nm} = 198331544,5 \text{ Nmm} \quad (188)$$

Faktor čvrstoće materijala vratila obzirom na način njegovog opterećenja odnosno naprezanja:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{300}{1,73 \cdot 230} = 0,75, [26], \text{ str. 11 i 34}$$

Presjek 3:

$$M_3 = F_A \cdot x_3 = 220453,42 \cdot 400 = 88181368 \text{ Nmm} \quad (189)$$



$$M_{\text{red3}} = \sqrt{M_3^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{88181368^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5)^2} = 156110781,8 \text{ Nmm} \quad (190)$$

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{\text{red3}}}{\sigma_{\text{fDNdop}}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 156110781,8}{50}} = 314,89 \text{ mm} \quad (191)$$

Presjek 4:

$$M_{\text{H4}} = F_{\text{AH}} \cdot x_4 - F_{\text{wt21}} \cdot (x_4 - x_3) = 211319,57 \cdot 650 - 275460,48 \cdot 250 = 68492600,5 \text{ Nmm} \quad (192)$$

$$M_{\text{V4}} = F_{\text{AV}} \cdot x_4 - F_{\text{wr21}} \cdot (x_4 - x_3) = 62799,27 \cdot 650 - 100259,41 \cdot 250 = 15754673 \text{ Nmm} \quad (193)$$

$$M_4 = \sqrt{M_{\text{H4}}^2 + M_{\text{V4}}^2} = \sqrt{68492600,5^2 + 15754673^2} = 70281192,68 \text{ Nmm} \quad (194)$$

$$M_{\text{red4}} = \sqrt{M_4^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{70281192,68^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5)^2} = 146744909,9 \text{ Nmm} \quad (195)$$

$$d_4 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{\text{red4}}}{\sigma_{\text{fDNdop}}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 146744909,9}{50}} = 308,46 \text{ mm} \quad (196)$$

Presjek 5:

$$M_{\text{H5}} = F_{\text{AH}} \cdot x_5 - F_{\text{wt21}} \cdot (x_5 - x_3) = 211319,57 \cdot 850 - 275460,48 \cdot 450 = 55664418,5 \text{ Nmm} \quad (197)$$

$$M_{\text{V5}} = F_{\text{AV}} \cdot x_5 - F_{\text{wr21}} \cdot (x_5 - x_3) = 62799,27 \cdot 850 - 100259,41 \cdot 450 = 8262645 \text{ Nmm} \quad (198)$$

$$M_5 = \sqrt{M_{\text{H5}}^2 + M_{\text{V5}}^2} = \sqrt{55664418,5^2 + 8262645^2} = 56274317,32 \text{ Nmm} \quad (199)$$

$$M_{\text{red5}} = \sqrt{M_5^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{56274317,32^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5)^2} = 140575322,6 \text{ Nmm} \quad (200)$$

$$d_5 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{\text{red5}}}{\sigma_{\text{fDNdop}}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 140575322,6}{50}} = 304,07 \text{ mm} \quad (201)$$

Presjek 6:

$$M_6 = F_{\text{B}} \cdot x_6 = 154112,12 \cdot 278 = 42843169,36 \text{ Nmm} \quad (202)$$

$$M_{\text{red6}} = \sqrt{M_6^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{42843169,36^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5)^2} = 135757724,2 \text{ Nmm} \quad (203)$$

$$d_6 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{red6}}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 135757724,2}{50}} = 300,56 \text{ mm} \quad (204)$$

### 3.9.1. Proračun ležajnih mjesta

Radijalno-aksijalno ležajno mjesto (ležajno mjesto A):

Aksijalna sila:

$$F_{Aa} = 15859,96 \text{ N} \quad (205)$$

Radijalna sila:

$$F_{Ar} = 220453,42 \text{ N} \quad (206)$$

Odabran bačvasti ležaj SKF 23952 CC/W33:

Dinamička nosivost:

$$C = 1000000 \text{ N} \quad (207)$$

Statička nosivost:

$$C_0 = 1800000 \text{ N} \quad (208)$$

Proračunski faktori dani u katalogu proizvođača, [27]:

$$Y_1 = 3,8 \quad (209)$$

$$Y_2 = 5,6 \quad (210)$$

$$Y_0 = 3,6 \quad (211)$$

$$e = 0,18 \quad (212)$$

Omjer aksijalne i radijalne sile:

$$\frac{F_{Aa}}{F_{Ar}} = \frac{15859,96}{220453,42} = 0,07 \leq e = 0,18 \quad (213)$$

Ekvivalentno dinamičko opterećenje:

$$F = F_{Ar} + Y_1 \cdot F_{Aa} = 220453,42 + 3,8 \cdot 15859,96 = 280721,27 \text{ N} \quad (214)$$

Trajnost ležaja u brojevima okretaja:

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^m = \left(\frac{1000000}{280721,27}\right)^{\frac{10}{3}} = 69,04 \cdot 10^6 \text{ okretaja} \quad (215)$$

Trajnost ležaja u radnim satima:

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n_{vr}} \cdot \left(\frac{C}{F}\right)^m = \frac{10^6}{60 \cdot 81,33} \cdot \left(\frac{1000000}{280721,27}\right)^{\frac{10}{3}} = 14147,5 \text{ h} \quad (216)$$

gdje je  $m$  prema [28], str. 773, a  $n_{vr} = n_R - n_{23} = 16 - (-65,33) = 81,33$  o/min relativna brzina vrtnje vratila u odnosu na brzinu vrtnje ručice.

Ekvivalentno statičko opterećenje:

$$F_0 = F_{Ar} = 220453,42 \text{ N} < C_0 = 1800000 \text{ N} \quad (217)$$

Radijalno ležajno mjesto (ležajno mjesto B):

Aksijalna sila:

$$F_a = 15859,96 \text{ N} \quad (218)$$

Radijalna sila:

$$F_{Br} = 154112,12 \text{ N} \quad (219)$$

Odabran jednoredni valjkasti ležaj SKF NU 1052 M:

Dinamička nosivost:

$$C = 627000 \text{ N} \quad (220)$$

Statička nosivost:

$$C_0 = 965000 \text{ N} \quad (221)$$

Omjer aksijalne i radijalne sile:

$$\frac{F_a}{F_{Br}} = \frac{15859,96}{154112,12} = 0,1 \leq e = 0,2 \quad (222)$$

Ekvivalentno dinamičko opterećenje:

$$F = F_{Br} = 154112,12 \text{ N} \quad (223)$$

Ekvivalentno statičko opterećenje:

$$F_0 = F_{Br} = 154112,12 \text{ N} < C_0 = 965000 \text{ N} \quad (224)$$

Trajnost ležaja u brojevima okretaja:

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^m = \left(\frac{627000}{154112,12}\right)^{\frac{10}{3}} = 107,51 \cdot 10^6 \text{ okretaja} \quad (225)$$

Trajnost ležaja u radnim satima:

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n_{vr}} \cdot \left(\frac{C}{F}\right)^m = \frac{10^6}{60 \cdot 81,33} \cdot \left(\frac{1000000}{280721,27}\right)^{\frac{10}{3}} = 22030,98 \text{ h} \quad (226)$$

### 3.9.2. Opterećenje vratila momentima u pojedinim presjecima

Moment u presjeku 1:

$$M_1 = F_A \cdot x_1 = 220453,42 \cdot 50 = 11022671 \text{ Nmm} \quad (227)$$

Moment u presjeku 2:

$$M_2 = F_A \cdot x_2 = 220453,42 \cdot 150 = 33068013 \text{ Nmm} \quad (228)$$

Moment u presjeku 3:

$$M_{red3} = \sqrt{(M_3 \cdot \beta_{kf3})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T \cdot \beta_{kt3})^2} \quad (229)$$

$$M_3 = F_A \cdot x_3 = 220453,42 \cdot 400 = 88181368 \text{ Nmm} \quad (230)$$

$$T = 198331544,5 \text{ Nmm} \quad (231)$$

$\beta_{kf3} = 1$ , vrtilo i zupčanik iz jednog dijela

$\beta_{kt3} = 1$ , vrtilo i zupčanik iz jednog dijela

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{300}{1,73 \cdot 230} = 0,75 \quad (232)$$

$$M_{red3} = \sqrt{(88181368 \cdot 1)^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5 \cdot 1)^2} = 156110781,8 \text{ Nmm} \quad (233)$$

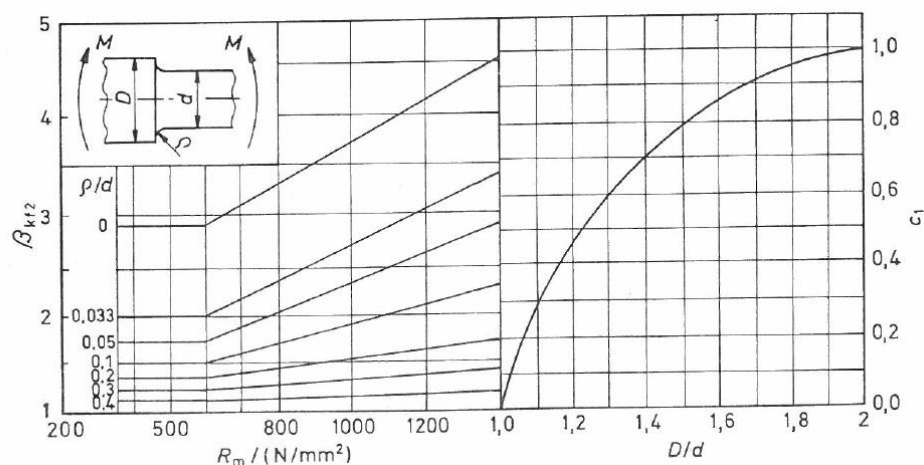
Moment u presjeku 4:

$$M_{red4} = \sqrt{(M_4 \cdot \beta_{kf4})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T \cdot \beta_{kt4})^2} \quad (234)$$

$$M_4 = 70281192,68 \text{ Nmm} \quad (235)$$

$$T = 198331544,5 \text{ Nmm} \quad (236)$$

$$\beta_{kf4} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) \quad (237)$$



Faktor  $\beta_{kf2}$  kod savijanja okretanjem  
štapova kod kojih se presjek mijenja u  
zavisnosti od  $R_m$ ,  $D/d = 2,0$  i  $\rho/d = 0 \dots 0,4$

Faktor za odnose  $D/d \neq 2,0$  ( $c_1$ )

$$\beta_{kf} = 1 + c_1(\beta_{kf2} - 1)$$

$\beta_{kf}$  = faktor zareznog djelovanja za odnose  
 $D/d \neq 2,0$

$\beta_{kf2}$  = faktor zareznog djelovanja za odnose  
 $D/d = 2,0$

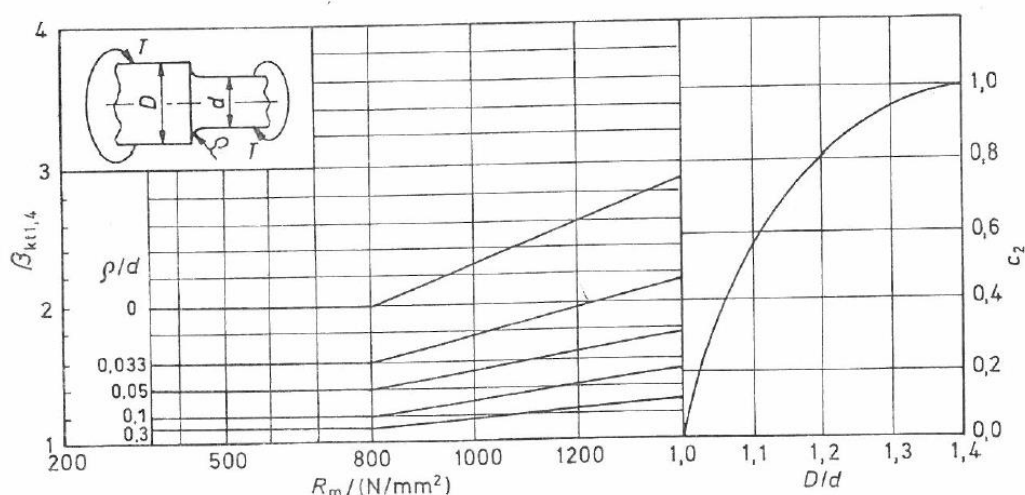
**Slika 44. Faktor  $\beta_{kf2}$  kod savijanja [26]**

$$c_1 = f(D/d = 480/400 = 1,2) = 0,45, [26], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf2} = f(\rho/d = 10/400 = 0,025, R_m = 1200, [25], \text{ str. 67}) = 4, [26], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf4} = 1 + 0,45 \cdot (4 - 1) = 2,35 \quad (238)$$

$$\beta_{kt4} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt1,4} - 1) \quad (239)$$



Faktor  $\beta_{k_{1,4}}$  kod uvijanja štapova kod

Faktor za odnose  $D/d \neq 1,4 (c_2)$

kojih se presjek mijenja u zavisnosti od

$R_m, D/d = 2,0$  i  $\rho/d = 0 \dots 0,4$

$$\beta_{k_u} = 1 + c_2(\beta_{k_{1,4}} - 1)$$

$\beta_{k_i}$  = faktor zareznog djelovanja za odnose  $D/d \neq 1,4$

$\beta_{k_{1,4}}$  = faktor zareznog djelovanja za odnose  $D/d = 1,4$

Slika 45. Faktor  $\beta_{kt1,4}$  kod uvijanja [26]

$$c_2 = f(D/d = 480/400 = 1,2) = 0,8, [26], \text{ str. 36 (slika 45)}$$

$$\beta_{kt1,4} = f(\rho/d = 10/400 = 0,025, R_m = 1200, [25], \text{ str. 67}) = 2,6, [26], \text{ str. 36 (slika 45)}$$

$$\beta_{kt4} = 1 + 0,8 \cdot (2,6 - 1) = 2,28 \quad (240)$$

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{300}{1,73 \cdot 230} = 0,75 \quad (241)$$

$$M_{red4} = \sqrt{(70281192,68 \cdot 2,35)^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5 \cdot 2,28)^2} = 336962277,6 \text{ Nmm} \quad (242)$$

Moment u presjeku 5:

$$M_{red5} = \sqrt{(M_5 \cdot \beta_{kf5})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T \cdot \beta_{kt5})^2} \quad (243)$$

$$M_5 = 56274317,32 \text{ Nmm} \quad (244)$$

$$T = 198331544,5 \text{ Nmm} \quad (245)$$

$$\beta_{kf5} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) \quad (246)$$

$$c_1 = f(D/d = 400/340 = 1,14) = 0,35, [2], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf2} = f(\rho/d = 10/350 = 0,029, R_m = 1200, [25], \text{str. 67}) = 3,5, [26], \text{str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf5} = 1 + 0,35 \cdot (3,5 - 1) = 1,88 \quad (247)$$

$$\beta_{kt5} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt1,4} - 1) \quad (248)$$

$$c_2 = f(D/d = 400/350 = 1,14) = 0,65, [26], \text{str. 36 (slika 45)}$$

$$\beta_{kt1,4} = f(\rho/d = 10/350 = 0,029, R_m = 1200, [25], \text{str. 67}) = 2,2, [26], \text{str. 36 (slika 45)}$$

$$\beta_{kt5} = 1 + 0,65 \cdot (2,2 - 1) = 1,78 \quad (249)$$

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{300}{1,73 \cdot 230} = 0,75 \quad (250)$$

$$M_{red5} = \sqrt{(56274317,32 \cdot 1,88)^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5 \cdot 1,78)^2} = 252529474,8 \text{ Nmm} \quad (251)$$

Moment u presjeku 6:

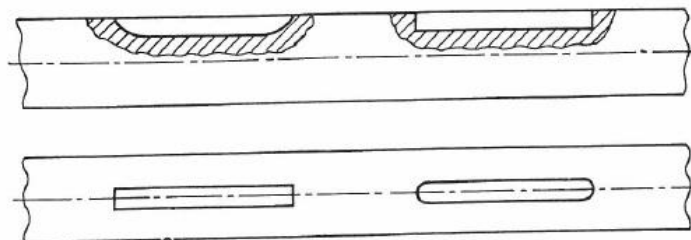
$$M_{red6} = \sqrt{(M_6 \cdot \beta_{kf6})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T \cdot \beta_{kt6})^2} \quad (252)$$

$$M_6 = 42843169,36 \text{ Nmm} \quad (253)$$

$$T = 198331544,5 \text{ Nmm} \quad (254)$$

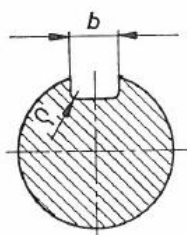
Tablica 4. Faktor zareznog djelovanja  $\beta_k$  kod savijanja vratila s utorom za pero

Oblik	Prekidna čvrstoća $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]					
	300	400	500	600	700	800
A	1,4	1,45	1,5	1,55	1,58	1,62
B	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1



Oblik: A B

Uzdužni utori vratila i osovina oblika A: utor izrađen pločastim glodalom  
 Oblik B: utor izrađen prstastim glodalom

Faktor zareznog djelovanja  $\beta_k$  kod uvijanja vratila s utorom za pero

za  $p = 0,10 \dots 0,15 \cdot b$  (mm):  
 $\beta_{k_i} = 1,8 \dots 2,0$

Slika 46. Faktori zareznog djelovanja  $\beta_{kf}$  i  $\beta_{kt}$  kod savijanja i uvijanja vratila s utorom za pero [26]

$$\beta_{kf6} = 2,1, [26], \text{ str. 38 (slika 46, oblik B)}$$

$$\beta_{kt6} = 2, [26], \text{ str. 38 (slika 46)}$$

$$M_{red6} = \sqrt{(42843169,36 \cdot 2,1)^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 198331544,5 \cdot 2)^2} = 272897799,5 \text{ Nmm} \quad (255)$$

Moment u presjeku 7:

$$M_7 = F_B \cdot y_7 = 154112,12 \cdot 78 = 12020745,36 \text{ Nmm} \quad (256)$$



### 3.9.3. Kontrola postojeće sigurnosti u pojedinim presjecima

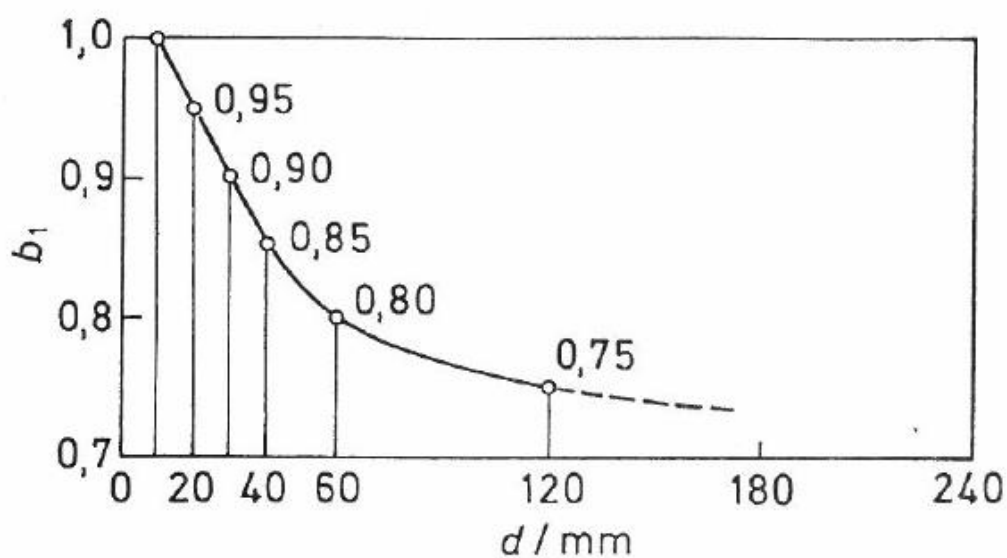
Faktor udara:  $\varphi = 1,2$

Presjek 1:

$$S_{\text{post1}} = \frac{b_{11} \cdot b_{21} \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \beta_{\text{kf1}} \cdot \sigma_{f1}} \geq S_{\text{potr}} \quad (257)$$

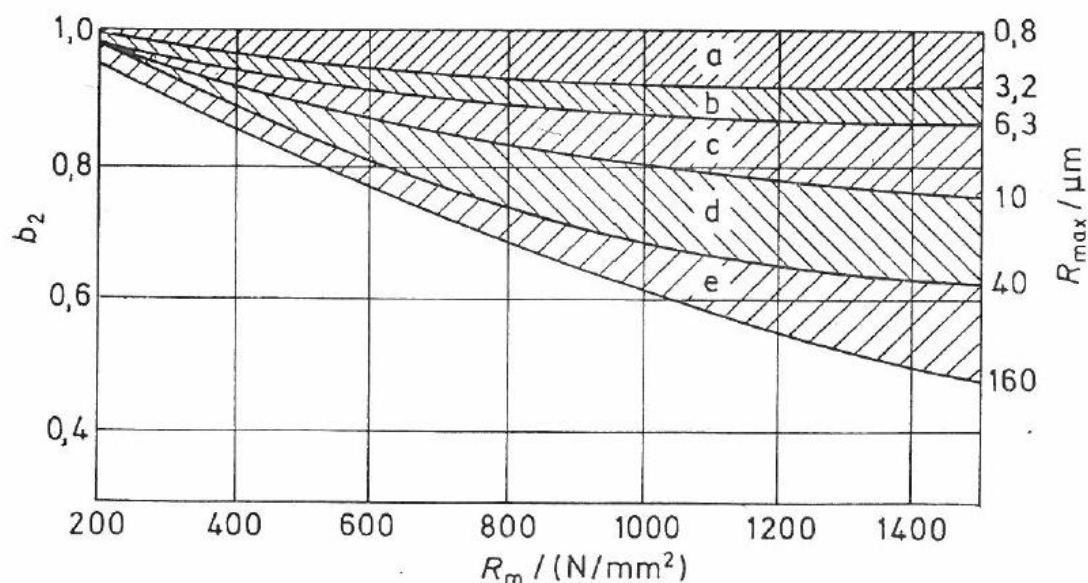
$$\sigma_{f1} = \frac{M_1}{W_1} \cong \frac{M_1}{0,1 \left( \frac{d_1^4 - d_u^4}{d_1} \right)} = \frac{11022671}{0,1 \cdot \left( \frac{260^4 - 100^4}{260} \right)} = 6,41 \text{ N/mm}^2 \quad (258)$$

$$\sigma_{\text{fDN}} = 300 \text{ N/mm}^2, [2], \text{ str. 34}$$



Slika 47. Faktor veličine strojnog dijela  $b_1$  kod savijanja i uvijanja [26]

Faktor veličine  $b_{11} = f(d) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 47)

Slika 48. Faktor kvalitete površinske obrade  $b_2$  [26]

Faktor kvalitete površine  $b_{21} = f(R_m = 1200 \text{ N/mm}^2, R_a = 3,2 \text{ μm}, R_{\max} = 20 \text{ μm}) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 48)

$$\beta_{kf1} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) \quad (259)$$

$$c_1 = f(D/d = 310/260 = 1,19) = 0,44, [2], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf2} = f(\rho/d = 1,5/260 = 0,006, R_m = 1200, [5], \text{ str. 67}) = 4,3, [2], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf1} = 1 + 0,44 \cdot (4,3 - 1) = 2,45 \quad (260)$$

$$S_{\text{post1}} = \frac{0,75 \cdot 0,75 \cdot 300}{1,2 \cdot 2,45 \cdot 6,41} = 9,14 \geq S_{\text{potr}} = 2,2 \quad (261)$$

Presjek 2:

$$S_{\text{post2}} = \frac{b_{12} \cdot b_{22} \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \beta_{kf2} \cdot \sigma_{f2}} \geq S_{\text{potr}} \quad (262)$$

$$\sigma_{f2} = \frac{M_2}{W_2} \cong \frac{M_2}{0,1 \left( \frac{d_2^4 - d_u^4}{d_2} \right)} = \frac{33068013}{0,1 \cdot \left( \frac{310^4 - 100^4}{310} \right)} = 11,22 \text{ N/mm}^2 \quad (263)$$

$$\sigma_{fDN} = 300 \text{ N/mm}^2, [26], \text{ str. 34}$$

$$\text{Faktor veličine } b_{12} = f(d) = 0,75, [26], \text{ str. 35 (slika 47)}$$

Faktor kvalitete površine  $b_{22} = f(R_m = 1200 \text{ N/mm}^2, R_a = 3,2 \text{ μm}, R_{\max} = 20 \text{ μm}) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 48)

$$\beta_{kf2} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) \quad (264)$$

$$c_1 = f(D/d = 480/310 = 1,55) = 0,83, [2], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf2} = f(\rho/d = 10/310 = 0,032, R_m = 1200, [5], \text{ str. 67}) = 3,5, [2], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{kf2} = 1 + 0,83 \cdot (3,5 - 1) = 3,08 \quad (265)$$

$$S_{\text{post2}} = \frac{0,75 \cdot 0,75 \cdot 300}{1,2 \cdot 3,08 \cdot 11,22} = 4,07 \geq S_{\text{potr}} = 2,2 \quad (266)$$

Presjek 3:

$$S_{\text{post3}} = \frac{b_{13} \cdot b_{23} \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red3}}} \geq S_{\text{potr}} \quad (267)$$

$$\sigma_{\text{red3}} = \frac{M_{\text{red3}}}{W_3} = \frac{M_{\text{red3}}}{0,1 \cdot \frac{(d_{a2} + d_{f2})^4}{2} - d_u^4} = \frac{156110781,8}{0,1 \cdot \frac{(520 + 430)^4}{2} - 100^4} = 14,6 \text{ N/mm}^2 \quad (268)$$

Faktor veličine  $b_{13} = f(d) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 47)

Faktor kvalitete površine  $b_{23} = f(R_m = 1200 \text{ N/mm}^2, R_a = 3,2 \mu\text{m}, R_{\text{max}} = 20 \mu\text{m}) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 48)

$$S_{\text{post3}} = \frac{0,75 \cdot 0,75 \cdot 300}{1,2 \cdot 14,6} = 9,63 \geq S_{\text{potr}} = 2,2 \quad (269)$$

Presjek 4:

$$S_{\text{post4}} = \frac{b_{14} \cdot b_{24} \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red4}}} \geq S_{\text{potr}} \quad (270)$$

$$\sigma_{\text{red3}} = \frac{M_{\text{red4}}}{W_4} = \frac{M_{\text{red4}}}{0,1 \cdot \frac{d_4^4 - d_u^4}{4}} = \frac{336962277,6}{0,1 \cdot \frac{400^4 - 100^4}{4}} = 52,86 \text{ N/mm}^2 \quad (271)$$

Faktor veličine  $b_{14} = f(d) = 0,75$ , [2], str. 35 (slika 47)

Faktor kvalitete površine  $b_{24} = f(R_m = 1200 \text{ N/mm}^2, R_a = 3,2 \mu\text{m}, R_{\text{max}} = 20 \mu\text{m}) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 48)

$$S_{\text{post4}} = \frac{0,75 \cdot 0,75 \cdot 300}{1,2 \cdot 52,86} = 2,66 \geq S_{\text{potr}} = 2,2 \quad (272)$$

Presjek 5:

$$S_{\text{post5}} = \frac{b_{15} \cdot b_{25} \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red5}}} \geq S_{\text{potr}} \quad (273)$$

$$\sigma_{\text{red5}} = \frac{M_{\text{red5}}}{W_5} = \frac{M_{\text{red5}}}{0,1 \cdot \frac{d_5^4 - d_u^4}{4}} = \frac{252529474,8}{0,1 \cdot \frac{350^4 - 100^4}{4}} = 59,29 \text{ N/mm}^2 \quad (274)$$

Faktor veličine  $b_{15} = f(d) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 47)

Faktor kvalitete površine  $b_{25} = f(R_m = 1200 \text{ N/mm}^2, R_a = 3,2 \text{ } \mu\text{m}, R_{\max} = 20 \text{ } \mu\text{m}) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 48)

$$S_{\text{post5}} = \frac{0,75 \cdot 0,75 \cdot 300}{1,2 \cdot 59,29} = 2,37 \geq S_{\text{potr}} = 2,2 \quad (275)$$

Presjek 6:

$$S_{\text{post6}} = \frac{b_{16} \cdot b_{26} \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red6}}} \geq S_{\text{potr}} \quad (276)$$

$$\sigma_{\text{red6}} = \frac{M_{\text{red5}}}{W_4} = \frac{M_{\text{red6}}}{0,1 \cdot \frac{d_6^4 - d_u^4}{d_6}} = \frac{12020745,36}{0,1 \cdot \frac{315,4^4 - 100^4}{315,4}} = 3,87 \text{ N/mm}^2 \quad (277)$$

Faktor veličine  $b_{16} = f(d) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 47)

Faktor kvalitete površine  $b_{26} = f(R_m = 1200 \text{ N/mm}^2, R_a = 3,2 \text{ } \mu\text{m}, R_{\max} = 20 \text{ } \mu\text{m}) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 48)

$$S_{\text{post6}} = \frac{0,75 \cdot 0,75 \cdot 300}{1,2 \cdot 3,87} = 36,34 \geq S_{\text{potr}} = 2,2 \quad (278)$$

Presjek 7:

$$S_{\text{post7}} = \frac{b_{17} \cdot b_{27} \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \beta_{\text{kf7}} \cdot \sigma_{\text{f7}}} \geq S_{\text{potr}} \quad (279)$$

$$\sigma_{\text{f7}} = \frac{M_7}{W_7} \cong \frac{M_7}{0,1 \left( \frac{d_7^4 - d_u^4}{d_7} \right)} = \frac{12020745,36}{0,1 \cdot \left( \frac{260^4 - 100^4}{260} \right)} = 6,99 \text{ N/mm}^2 \quad (280)$$

$$\sigma_{\text{fDN}} = 300 \text{ N/mm}^2, [26], \text{ str. 34}$$

Faktor veličine  $b_{17} = f(d) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 47)

Faktor kvalitete površine  $b_{27} = f(R_m = 1200 \text{ N/mm}^2, R_a = 3,2 \text{ } \mu\text{m}, R_{\max} = 20 \text{ } \mu\text{m}) = 0,75$ , [26], str. 35 (slika 47)

$$\beta_{\text{kf2}} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{\text{kf2}} - 1) \quad (281)$$

$$c_1 = f(D/d = 340/260 = 1,31) = 0,61, [26], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{\text{kf2}} = f(\rho/d = 10/260 = 0,038, R_m = 1200, [25], \text{ str. 67}) = 3,5, [26], \text{ str. 36 (slika 44)}$$

$$\beta_{\text{kf7}} = 1 + 0,61 \cdot (3,5 - 1) = 2,53 \quad (282)$$

$$S_{\text{post7}} = \frac{0,75 \cdot 0,75 \cdot 300}{1,2 \cdot 2,53 \cdot 6,99} = 7,95 \geq S_{\text{potr}} = 2,2 \quad (283)$$

### 3.10. Proračun i kontrola u odnosu na dozvoljenu temperaturu zagrijavanja

Površina isijavanja:

a) Kućište:

$$A_K = A_{ul} + A_{sr} + A_{izl} = 8912862,43 + 19716829,4 + 18242524,43 = 46872216,26 \text{ mm}^2 \quad (284)$$

gdje je  $A_{ul}$  površina ulaznog dijela kućišta,  $A_{sr}$  površina srednjeg dijela kućišta,  $A_{izl}$  površina izlaznog dijela kućišta, sve u  $\text{mm}^2$ .

b) Prirubnice:

$$A_P = A_{ulp} + A_{izlp1} + A_{izlp2} + 2 \cdot A_{pogsrp} + A_{pogizlp} = 1735383,35 + 433972,14 + 84099,51 + 2 \cdot 651198,67 + 426823,67 = 3982676,01 \text{ mm}^2 \quad (285)$$

gdje je  $A_{ulp}$  površina prirubnice ulaznog dijela kućišta,  $A_{izlp1}$  površina prirubnice izlaznog dijela kućišta,  $A_{izlp2}$  površina prirubnice izlaznog vratila,  $A_{pogsrp}$  površina prirubnice za pregled multiplikatora na srednjem dijelu kućišta,  $A_{pogizlp}$  površina prirubnice za pregled multiplikatora na unutarnjem dijelu kućišta, sve u  $\text{mm}^2$ .

Ukupna površina isijavanja:

$$A = A_K + A_P = 46872216,26 + 3982676,01 = 50854892,27 \text{ mm}^2 = 50,85 \text{ m}^2 \quad (286)$$

Ukupni gubici u reduktoru:

Maksimalni moment s uključenim gubicima u multiplikatoru [8] (slika 6):

$$T_{gu,max} = 970 \text{ kNm} \quad (287)$$

Maksimalni moment bez gubitaka:

$$T_{max} = \frac{P_{max}}{\omega_N} = \frac{60 \cdot P_{max}}{2\pi \cdot n_N} = \frac{60 \cdot 1800000}{2\pi \cdot 16} = 1074295,87 \text{ Nm} \quad (288)$$

Ukupni gubici izraženi postotkom:

$$P'_{g,uk} = \left(1 - \frac{T_{gu,max}}{T_{max}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{970000}{1074295,87}\right) \cdot 100\% = 9,71\% \quad (289)$$

Ukupno izgubljena snaga:

$$P_{g,uk} = P'_{g,uk} \cdot P_N = 0,0971 \cdot 1800000 = 174780 \text{ W} = 174,78 \text{ kW} \quad (290)$$

Ukupno proizvedena toplina:

$$\Phi = P_{g,uk} \cdot 3600 = 174,78 \cdot 3600 = 629208 \text{ kJ/h} \quad (291)$$

Temperatura ulja:

$$t_u = \frac{\Phi}{\alpha_s \cdot A} + t_z = \frac{629208}{34 \cdot 50,85} + 20 = 383,94 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (292)$$

gdje je  $t_z$  temperatura okolnog zraka, uzeto prema HRN M.C1.031 20°C, a  $\alpha_s$  koeficijent prijelaza topline kod isijavanja, za prijenosnike u zatvorenom prostoru cca. 30 – 34 kJ/m<sup>2</sup>K, [25], str 24.

Podmazivanje i hlađenje multiplikatora cirkulacijskim uljem:

Ukoliko se pretpostavi da je trajna temperatura ulja 45°C, toplina odvedena prirodnim hlađenjem iznosi:

$$\Phi_{odv} = \alpha_s \cdot A \cdot (t_u - t_z) = 34 \cdot 50,85 \cdot (45 - 20) = 43222,5 \text{ kJ/h} \quad (293)$$

Prema [5], str. 26 potrebna količina rashladnog ulja iznosi:

$$Q_u = \frac{\Phi - \Phi_{odv}}{\Delta t \cdot \gamma \cdot c_p} = \frac{629208 - 43222,5}{15 \cdot 8,8 \cdot 0,17} = 26113,4 \text{ l/h} = 435,22 \text{ l/min} = 26,11 \text{ m}^3/\text{h} \quad (294)$$

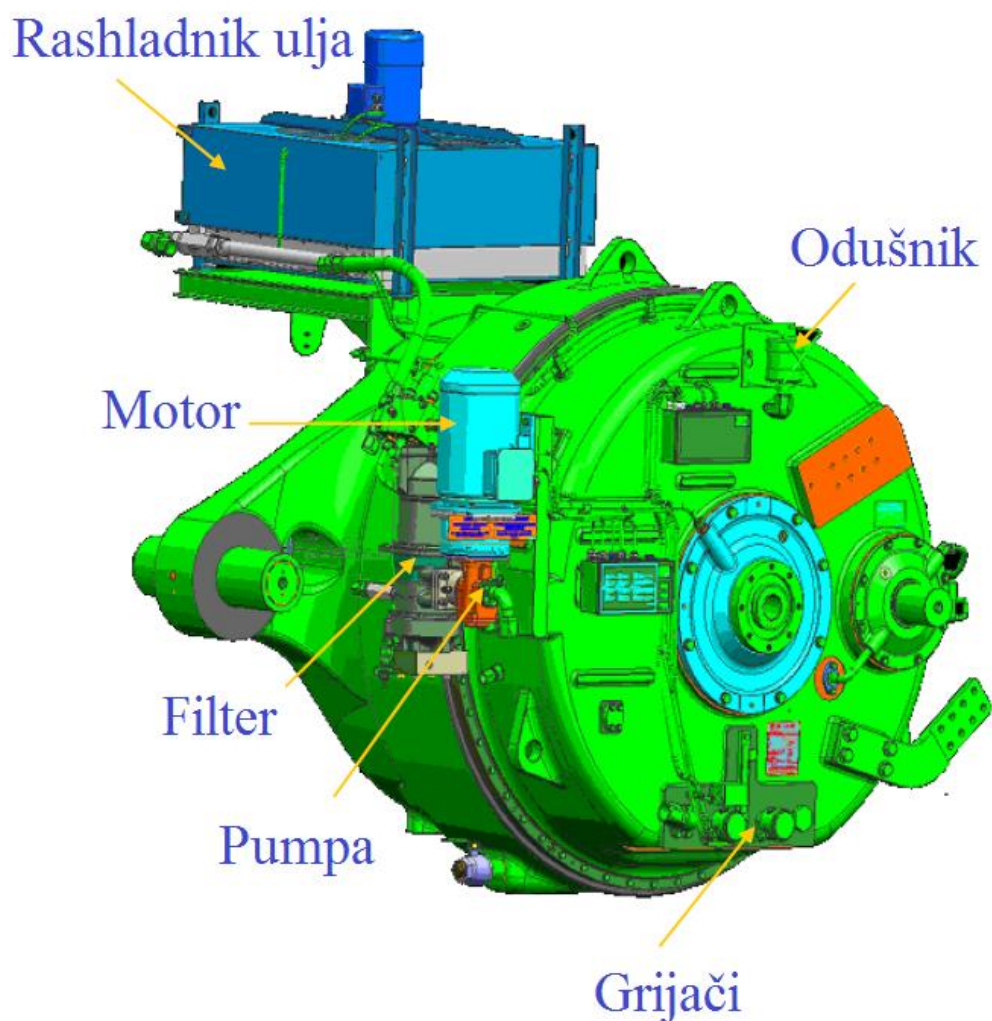
gdje je  $\Delta t = 10 \dots 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  razlika između izlazne i ulazne temperature ulja za ulje koje se hladi u spremniku, [25], str 26,  $\gamma$  specifična težina ulja, odabrano 8,8 N/dm<sup>3</sup>,  $c_p$  specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, za ulje 0,17 kJ/kgK.

Minimalna zapremina ulja u spremniku za ulje iznosi (gdje je  $P_N$  u kW, prema [18]):

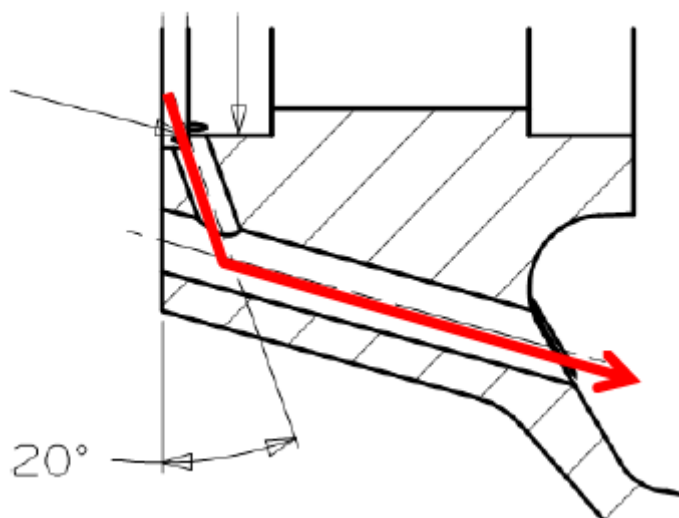
$$V_{min} = P_N \cdot 0,16 \cdot 1,1 = 1800 \cdot 0,16 \cdot 1,1 = 316,8 \text{ l} \quad (295)$$

Podmazivanje i hlađenje multiplikatora čini se pomoću posebnog sustava koji uključuje pumpu, filter ulja, spremnik ulja, sustav hlađenja ulja, odušnik te sustav dopremanja ulja na potrebna mjesta u multiplikatoru (ležajeve, zupčanike). Sustav hlađenja i podmazivanja multiplikatora u ovom diplomskom radu neće se obrađivati, samo će biti kratko pretstavljen. Bitno je još napomenuti da samo hlađenje ulja ovisi o uvjetima unutar samog kućišta vjetroatregata (gdje je smješten multiplikator) kao i o uvjetima u okolini. Uvjeti u okolini mogu biti različiti ovisno od mjesta gdje se postavlja vjetroatregat, prema [18] vjetroatregati *GE* se postavljaju u najrazličitijim okolišnim uvjetima od okolnih temperatura -30°, do temperatura +45°, tako da su uvjeti okoliša nepoznati. Dodatno, nepoznati su i uvjeti unutar kućišta vjetroatregata u kojem je smješten multiplikator, dakle, prozračuje li se to kućište ili je zatvoreno, i slične stvari.

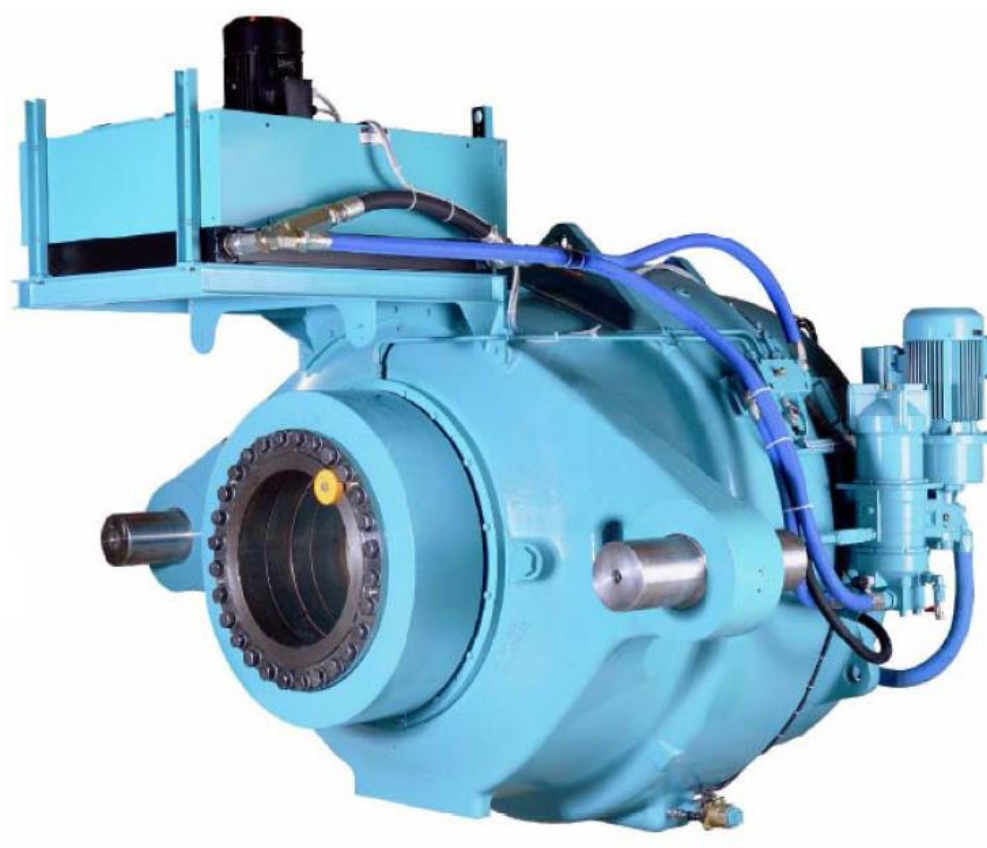
Slika 49 prikazuje sustava hlađenja i podmazivanja multiplikatora, spremnik ulja se hladi ventilatorom koji pokreće elektromotor, na slikama 49 i 51 vidljivo iznad rashladnika ulja. Slika 51 prikazuje kataloški prikaz multiplikatora zajedno s sustavom hlađenja i podmazivanja. Ulje se na potrebna mjesta u multiplikatoru (zupčanici, ležajevi) dovodi kroz kućište, princip dovodenja ulja kroz kućište vidljiv je na slici 50.



**Slika 49.** Sustav hlađenja i podmazivanja multiplikatora [18]



Slika 50. Dostava ulja kroz kućište multiplikatora [18]



Slika 51. Kataloški prikaz multiplikatora zajedno sa sustavom hlađenja i podmazivanja [18]



### 3.11. Izvadak iz proračuna

U nastavku su tablično prikazani svi relevantni elementi dobiveni proračunom:

**Tablica 2. Prijenosni omjeri**

Planetarnog 2UV sloga (parovi $z_1$ - $z_2$ i $z_3$ - $z_4$ )	$1/16,25 = 0,06154$
Zupčaničkog para $z_5$ - $z_6$	$1/4 = 0,25$
Ukupni	$1/65 = 0,01538$

**Tablica 3. Brojevi zubi pojedinih elemenata prijenosnika**

Prsten $z_1$	122
Zupčanik $z_2$	24
Zupčanik $z_3$	90
Zupčanik $z_4$	30
Zupčanik $z_5$	55
Zupčanik $z_6$	14

**Tablica 4. Kutevi nagiba boka ( $\beta$ ) pojedinih zupčaničkih parova**

Par $z_1$ - $z_2$	$0^\circ$
Par $z_3$ - $z_4$	$10^\circ$
Par $z_5$ - $z_6$	$14^\circ$

**Tablica 5. Normalni moduli ( $m_n$ ) pojedinih zupčaničkih parova**

Par $z_1$ - $z_2$	20
Par $z_3$ - $z_4$	16
Par $z_5$ - $z_6$	16

**Tablica 6. Diobeni promjeri pojedinih elemenata prijenosnika (u čelnoj ravnini za zupčanike s kosim ozubljenjem)**

Prsten $z_1$ ( $d_1$ )	2440 mm
Zupčanic $z_2$ ( $d_2$ )	480 mm
Zupčanic $z_3$ ( $d_{t3}$ )	1462,21 mm
Zupčanic $z_4$ ( $d_{t4}$ )	487,4 mm
Zupčanic $z_5$ ( $d_{t5}$ )	906,94 mm
Zupčanic $z_6$ ( $d_{t6}$ )	230,86 mm

**Tablica 7. Osni razmaci nakon pomaka profila**

Par $z_1$ - $z_2$	570 mm
Planetarnog 2UV sloga (parovi $z_1$ - $z_2$ i $z_3$ - $z_4$ )	980 mm

**Tablica 8. Faktori pomaka profila**

Prsten $z_1$ ( $x_1$ )	0
Zupčanik $z_2$ ( $x_2$ )	0
Zupčanik $z_3$ ( $x_3$ )	0,11
Zupčanik $z_4$ ( $x_4$ )	0,22
Zupčanik $z_5$ ( $x_5$ )	0,07
Zupčanik $z_6$ ( $x_6$ )	0

**Tablica 9. Mjere preko nekoliko zubi**

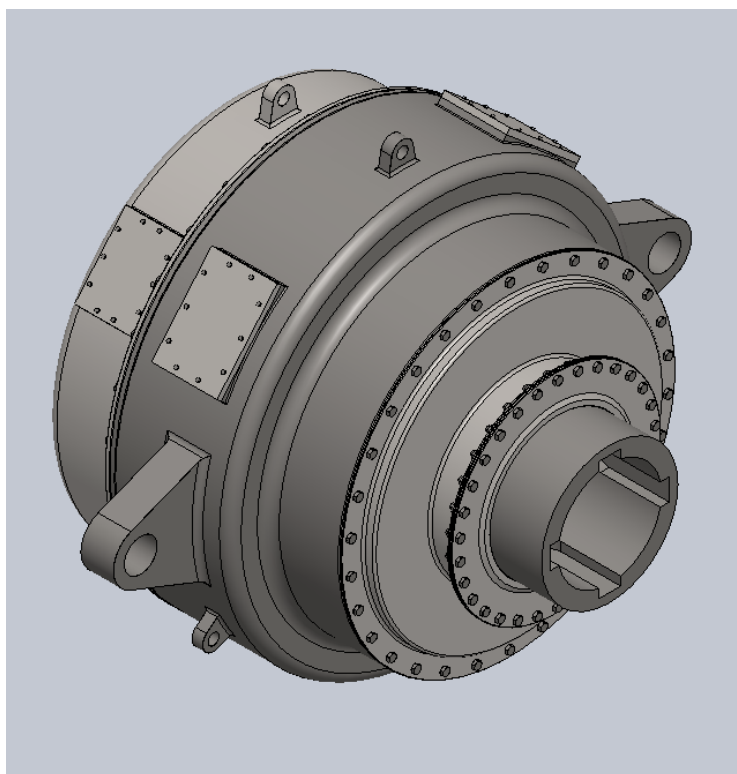
Zupčanik	Mjerni broj zubi ( $z_w$ )	Mjera preko nekoliko zubi ( $W_{Aw,d}^{Aw,g}$ ) u mm	Kvaliteta ozubljenja, polje tolerancija
Prsten $z_1$	15	$862,84_{-0,624}^{-0,468}$	S" 9ed5 HRN M.C1.031
Zupčanik $z_2$	4	$213,37_{-0,402}^{-0,268}$	S" 9fe5 HRN M.C1.031
Zupčanik $z_3$	11	$517,34_{-0,552}^{-0,414}$	S" 9ed5 HRN M.C1.031
Zupčanik $z_4$	5	$221,68_{-0,372}^{-0,248}$	S" 9fe5 HRN M.C1.031
Zupčanik $z_5$	7	$320,11_{-0,520}^{-0,390}$	S" 9ed5 HRN M.C1.031
Zupčanik $z_6$	3	$121,22_{-0,348}^{-0,232}$	S" 9fe5 HRN M.C1.031

**Tablica 10. Materijali zupčanika**

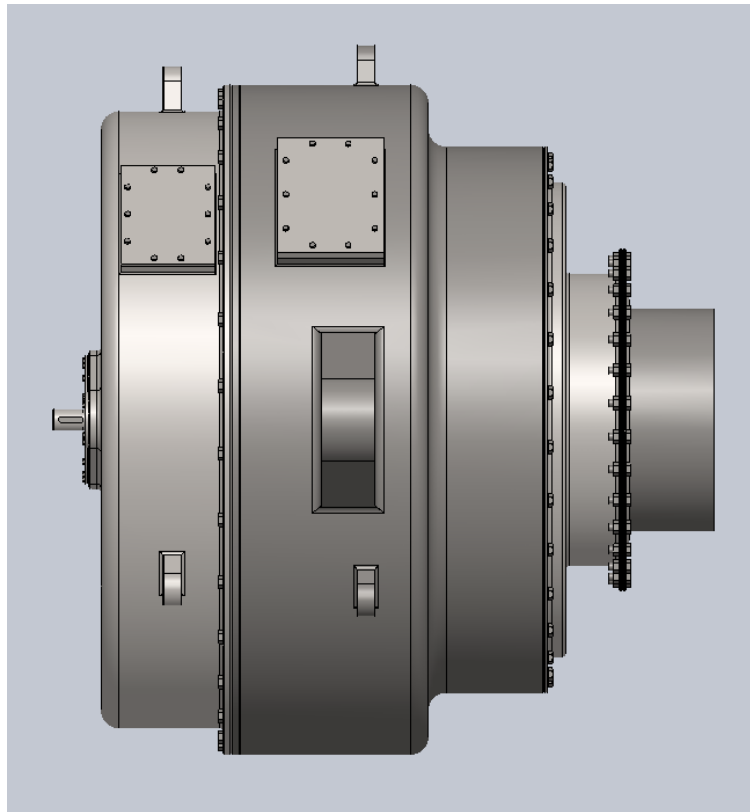
Prsten $z_1$	31 CrMoV 9 (DIN), - (HRN), nitrirano u plinu
Zupčanik $z_2$	31 CrMoV 9 (DIN), - (HRN), nitrirano u plinu
Zupčanik $z_3$	Ck 45 (DIN), Č 1531 (HRN), nitrirano u solnoj kupki
Zupčanik $z_4$	Ck 45 (DIN), Č 1531 (HRN), nitrirano u solnoj kupki
Zupčanik $z_5$	31 CrMoV 9 (DIN), - (HRN), nitrirano u plinu
Zupčanik $z_6$	31 CrMoV 9 (DIN), - (HRN), nitrirano u plinu

## 4. MODEL MULTIPLIKATORA

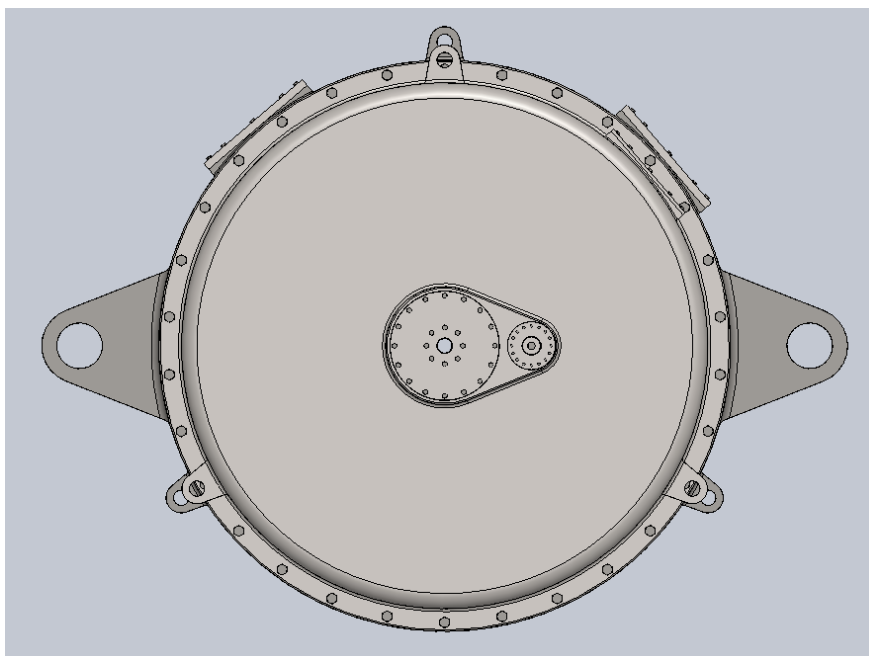
Model multiplikatora vjetroagregata rađen je u programskom paketu SolidWorks te se sastoji od svih nestandardnih dijelova i sklopa multiplikatora. U nastavku slijedi pregled pogleda i presjeka sklopa multiplikatora kao i pregled pogleda i presjeka nekih ključnih dijelova.



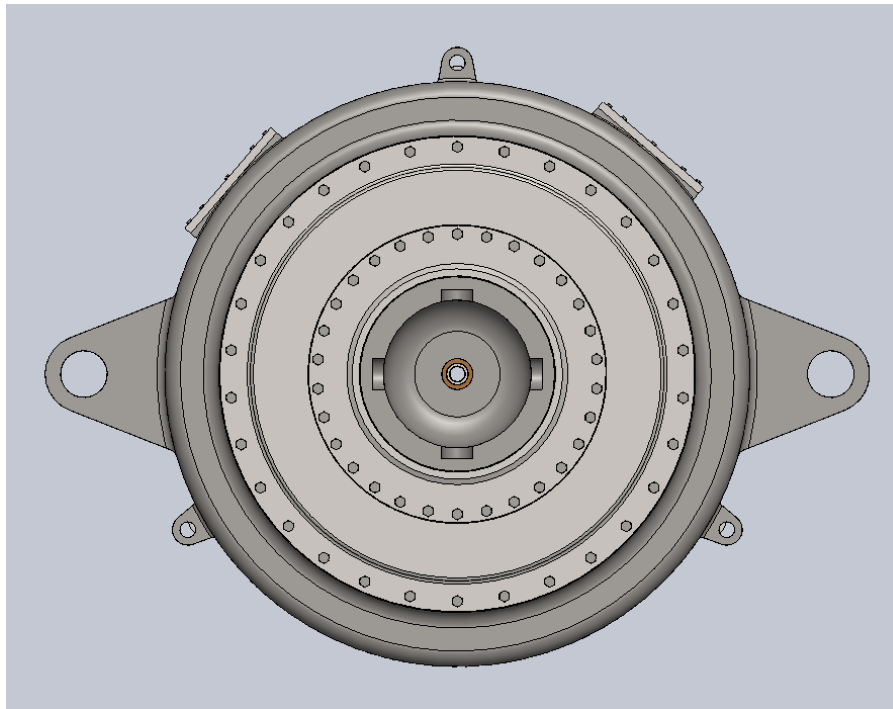
**Slika 52.      Prikaz sklopa multiplikatora u izometriji**



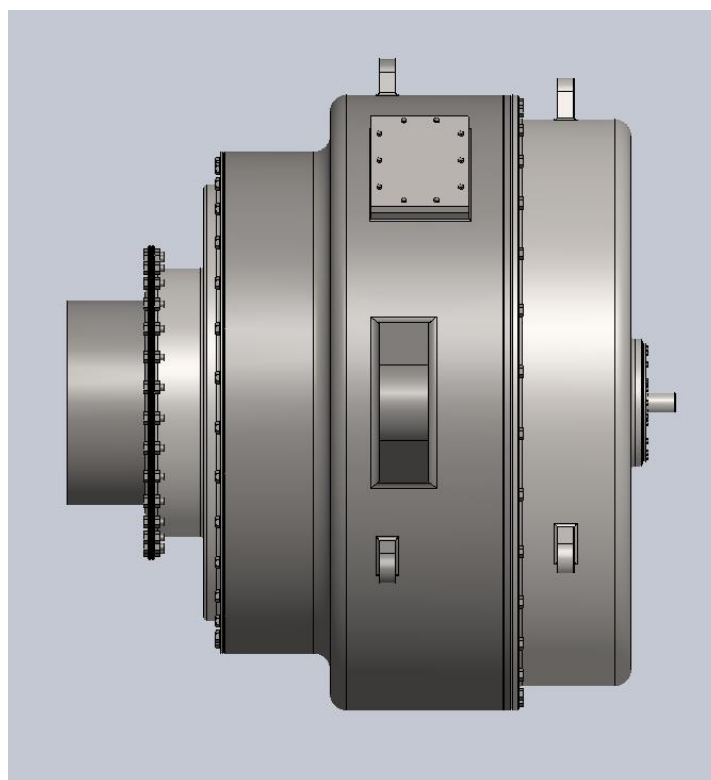
**Slika 53. Nacrt sklopa multiplikatora**



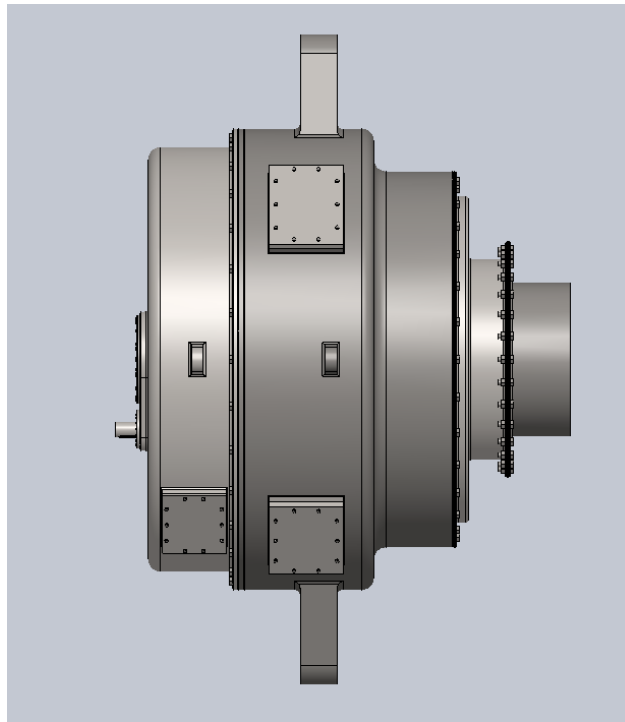
**Slika 54. Desni bokocrt mutiplikatora**



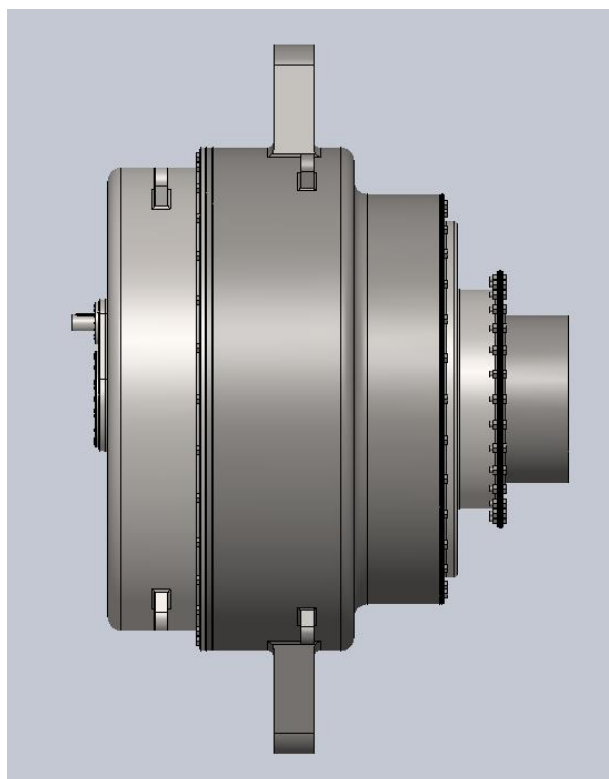
**Slika 55. Lijevo bokocrt multiplikatora**



**Slika 56. Stražnji nacrt mutiplikatora**

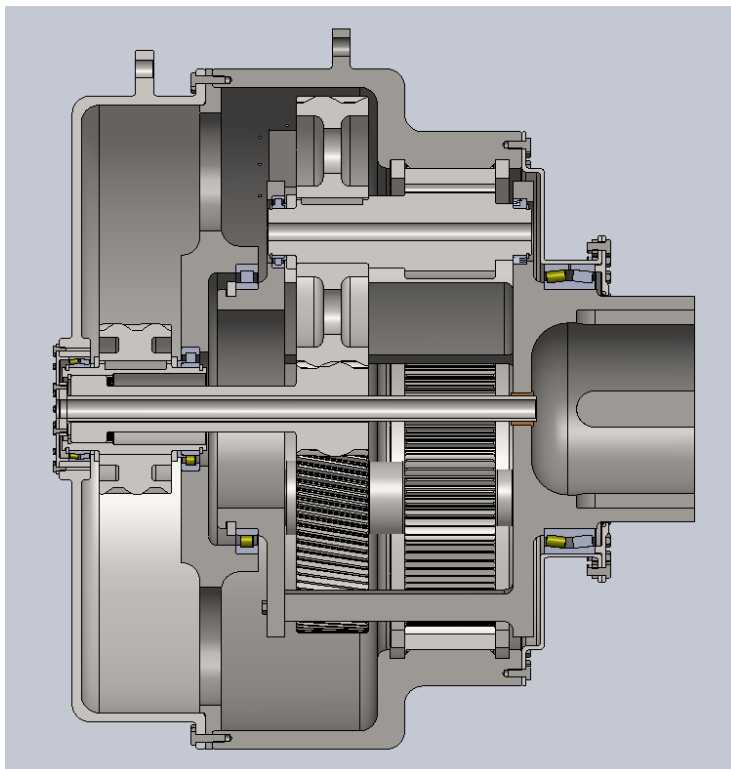


**Slika 57. Tlocrt multiplikatora**

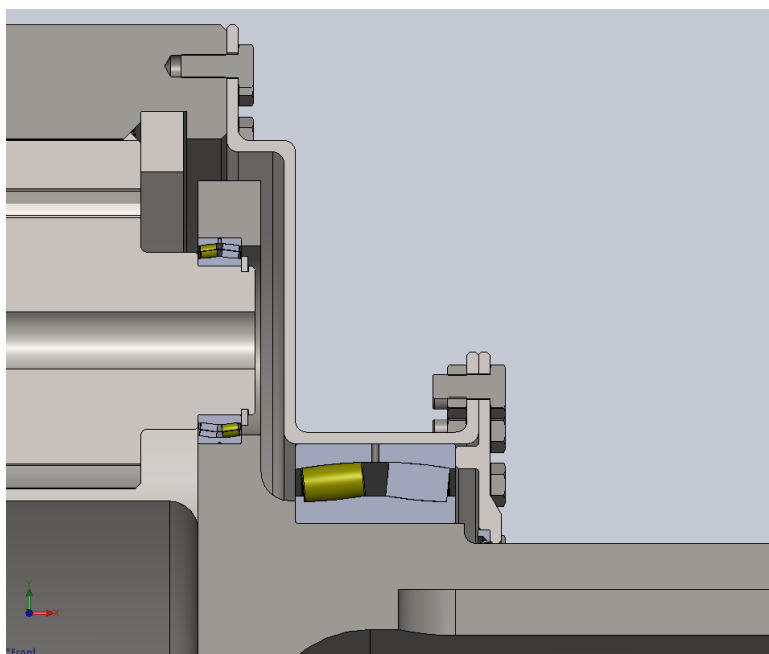


**Slika 58. Donji tlocrt mutiplikatora**



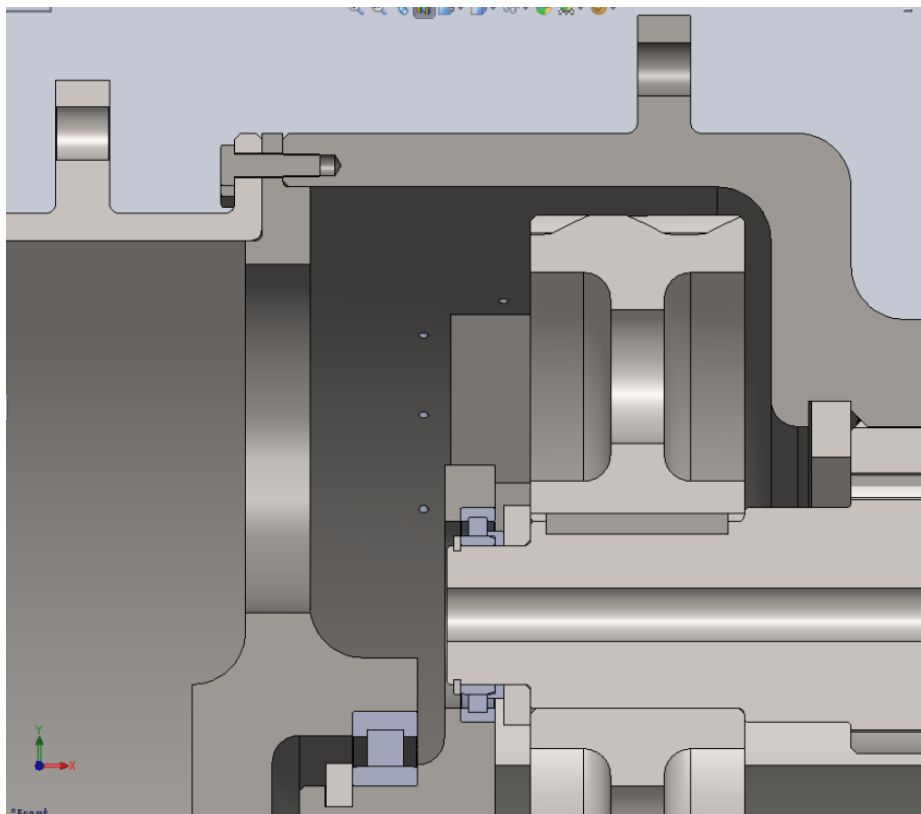


**Slika 59. Presjek u nacrtu**

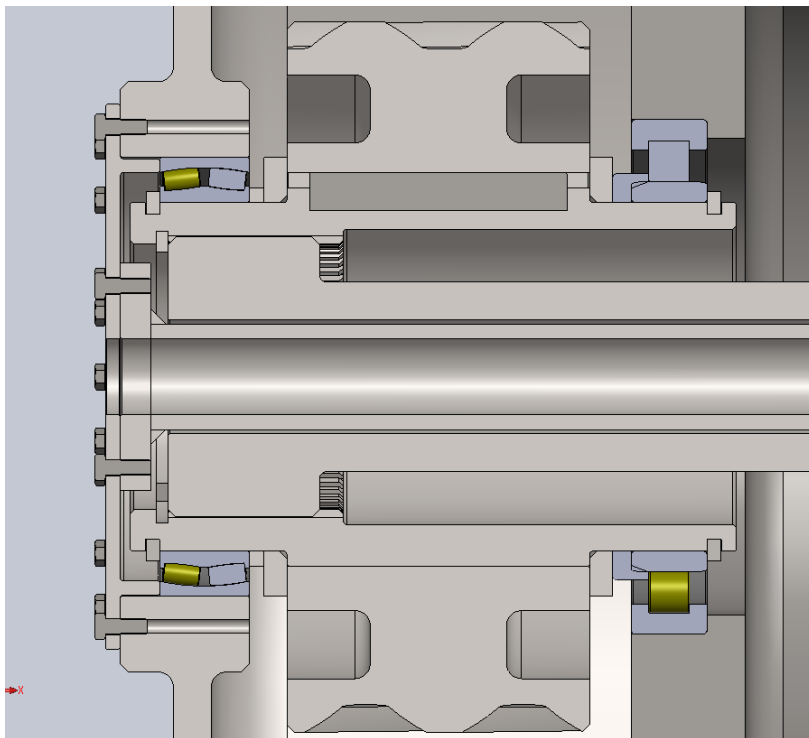


**Slika 60. Detalj radialno-aksijalnih ležajnih mjesta nosača planeta i vratila zupčanika  $z_2$**

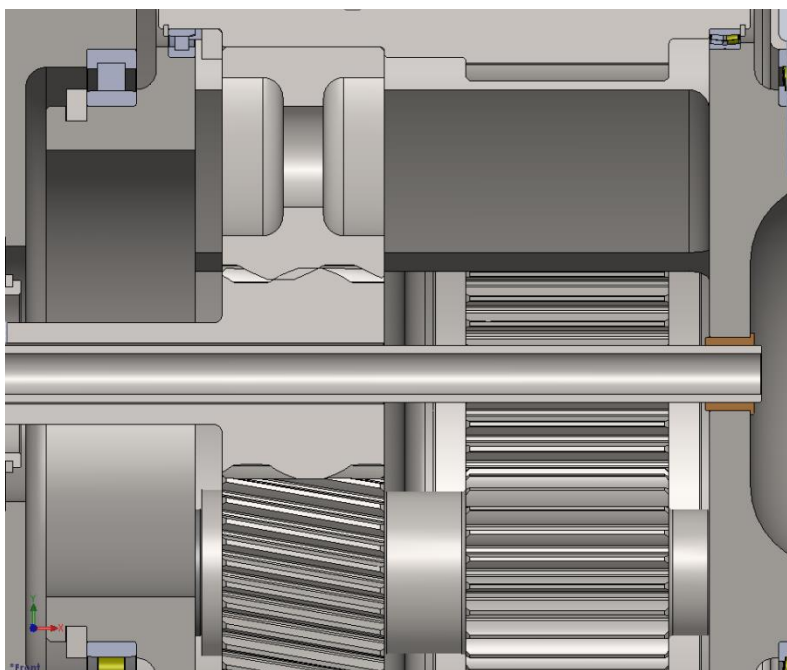
Na slici 60 su uočljiva radijalno-aksijalna ležajna mjesta nosača planeta i vratila manjeg planetnog zupčanika  $z_2$  kao i vijčani spojevi dijelova kućišta. Radijalno-aksijalno ležajno mjesto nosača planeta nije osigurano uskočnikom iz razloga što je aksijalna sila na to ležajno mjesto uvijek usmjerena u smjeru koji pritišće ležaj na poklopac kućišta (prema desno sa slike 60). Također se može uočiti i uskočnik koji pridrži prstenasti zupčanic  $z_1$  za kućište (gornji desni ugao slike).



**Slika 61.      Detalj većeg planeta i radijalnih ležajnih mjesta nosača planeta i vratila zupčanika  $z_2$**

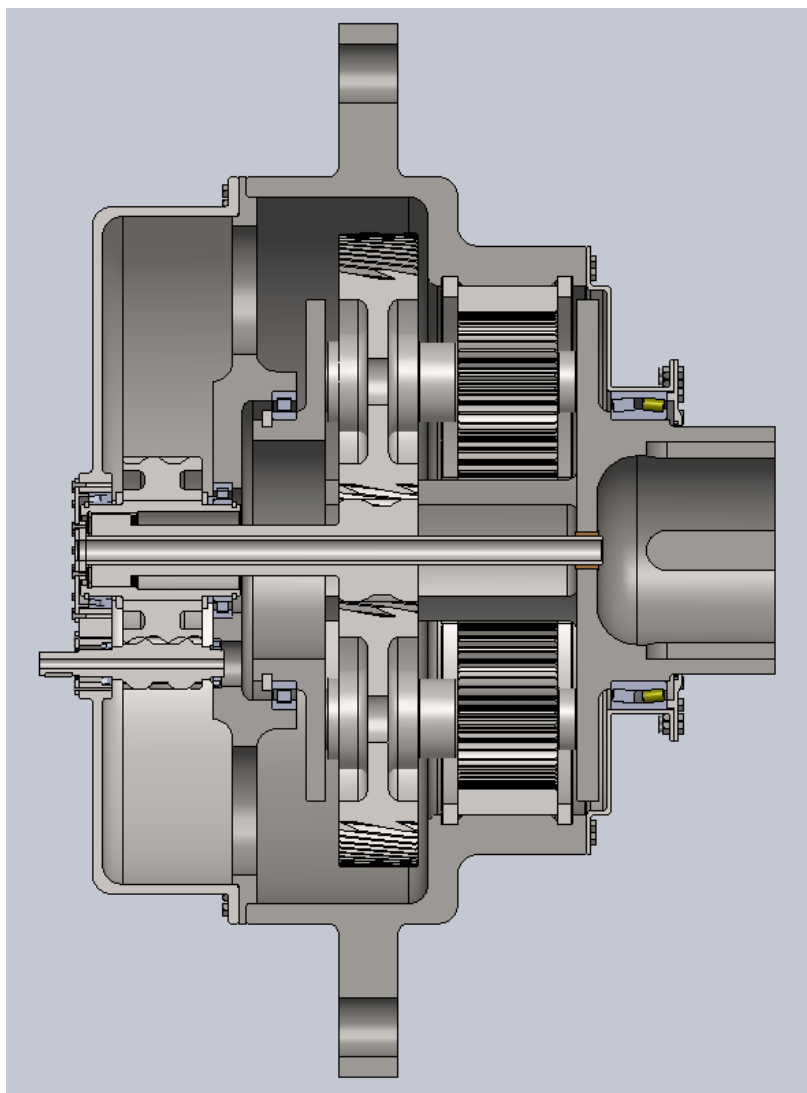


**Slika 62.**      Detalj vratila većeg zupčanika zadnjeg stupnja  $z_5$



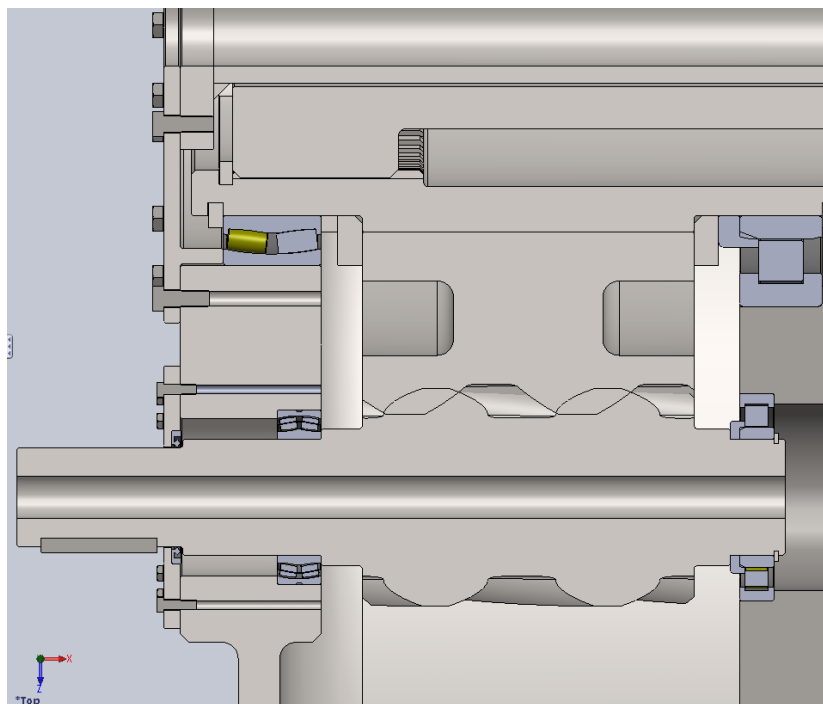
**Slika 63.**      Detalj cijevi ožičenja multiplikatora

Na slikama 62 i 63 vidljiva je mala zračnost između sunčanika i cijevi ožičenja multiplikatora, cijev ožičenja služi da žice potrebne za upravljanje kutem zakreta vjetroturbine dođu do nje kroz multiplikator.

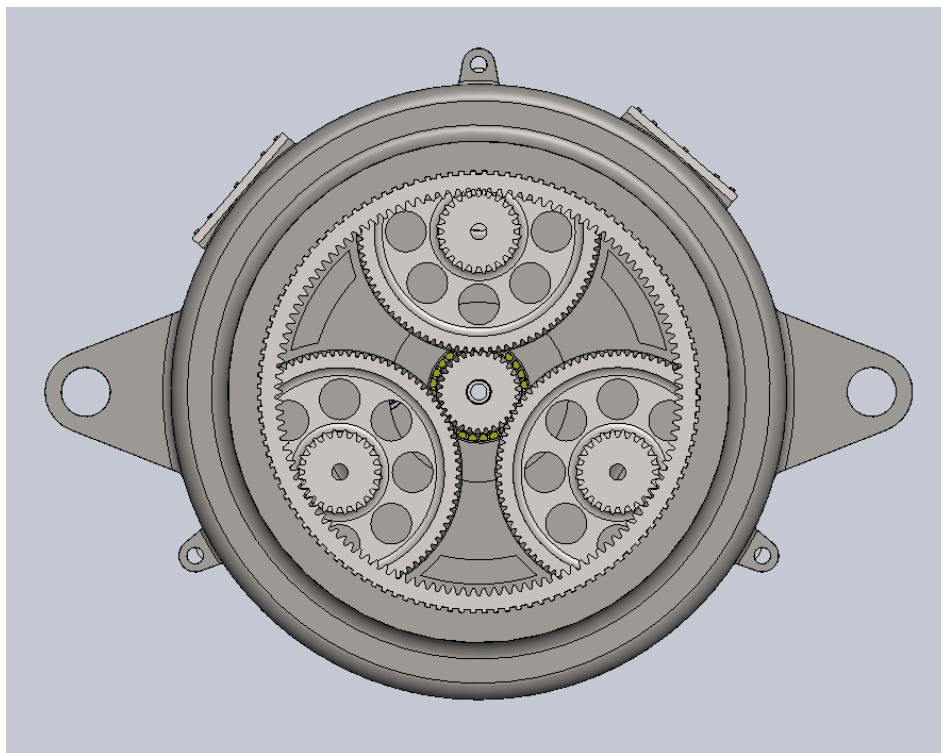


**Slika 64. Presjek multiplikatora u tlocrtu**

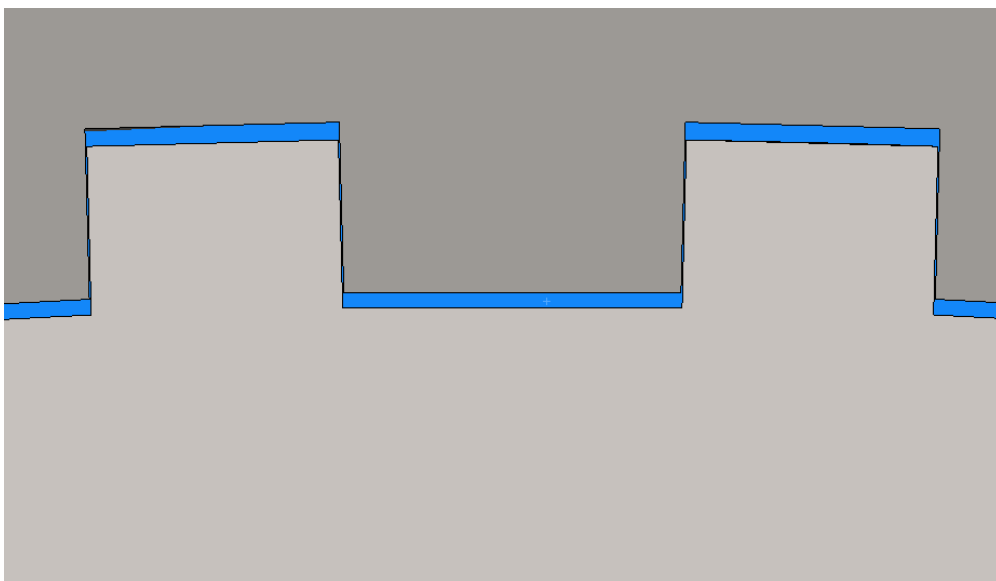
Radijalno-aksijalno ležajno mjesto izlaznog vratila-zupčanika  $z_6$  nema prstenasti uskočnik da ga osigurava jer je aksijalna sila usmjerena tako da upire radijalno-aksijalni sferni ležaj (lijevo ležajno mjesto na slici 65) u kućište. Prstenasti uskočnik bi na izlaznom vratilu, jednako kao i na nosaču planeta (detalj na slici 60) izazivao nepovoljno zarezno djelovanje na vratilu koje je na tim mjestima opterećeno na uvijanje te bi na taj način značajno smanjilo čvrstoću vratila na tim mjestima. Stoga je konstrukcija napravljena tako da na tim ležajnim mjestima nema potrebe za prstenastim uskočnikom.



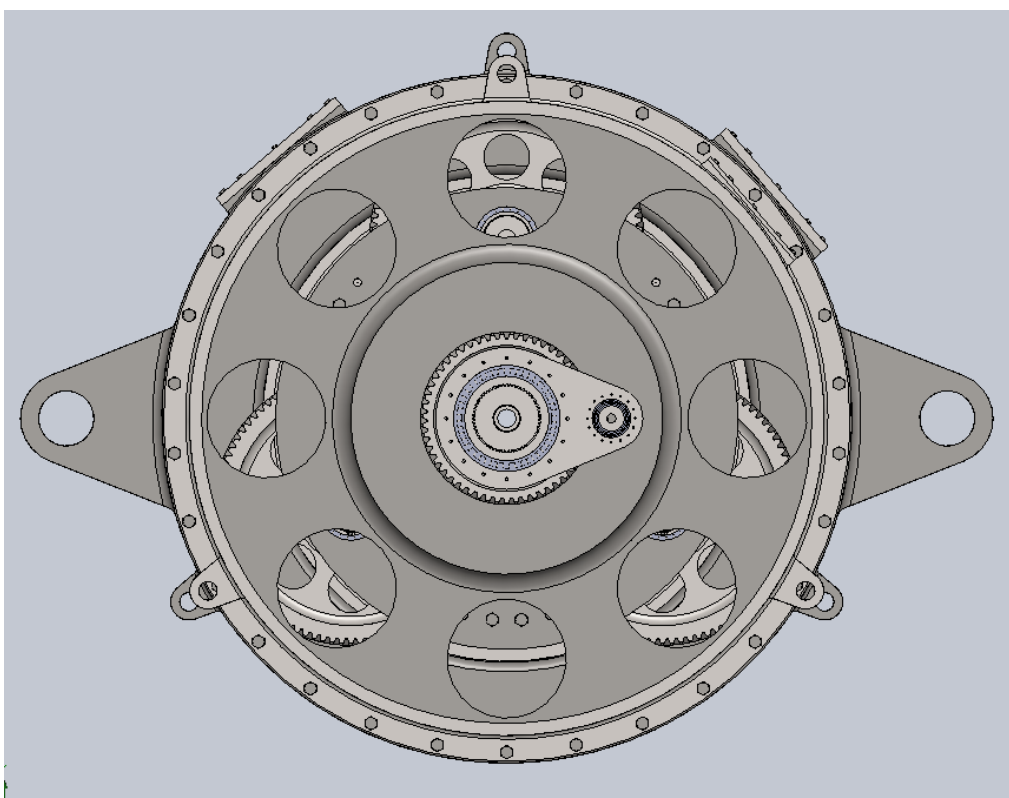
**Slika 65.**      Detalj ležajnih mjesta izlaznog vratila-zupčanika  $z_6$



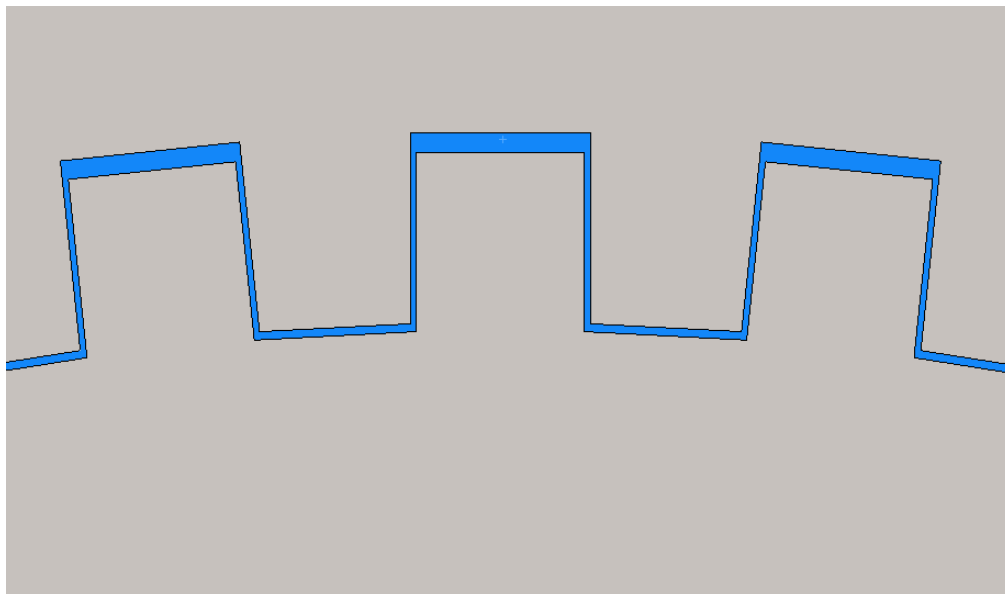
**Slika 66.**      Presjek prstena u kućištu



**Slika 67.**      Detalj zupčaste spojke prstena s kućištem

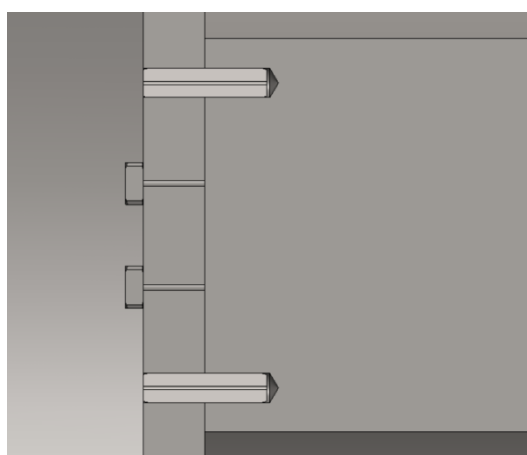


**Slika 68.**      Presjek sunčanika i većeg vratila zadnjeg stupnja u kućištu

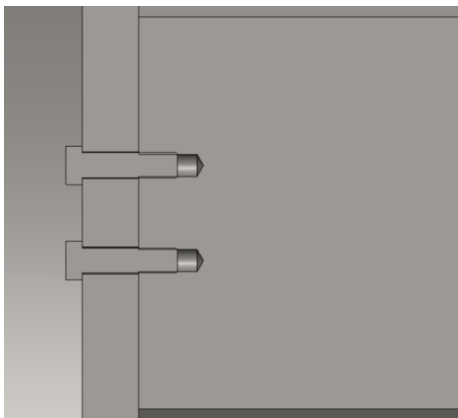


**Slika 69.** Detalj zupčaste spojke sunčanika s većim vrtilom zadnjeg stupnja

Prsten i sunčanik planetarnog stupnja prijenosa multiplikatora izrađeni kao *plivajući* elementi. Postojanje *plivajućih* elemenata je potrebno radi izjednačavanja eventualne pojave nejednolike raspodjele opterećenja kod planetarnog stupnja prijenosa. U ovom slučaju *plivajući* elementi su ostvareni zupčastim spojkama. Na slikama 67 i 69 je vidljivo da zupčaste spojke imaju osim radijalne zračnosti i zračnost između zubi spojke. Radijalna zračnost služi za ispravljanje nejednolike raspodjele opterećenja dok zračnost između zubi postoji radi uvijek jednostavne montaže.

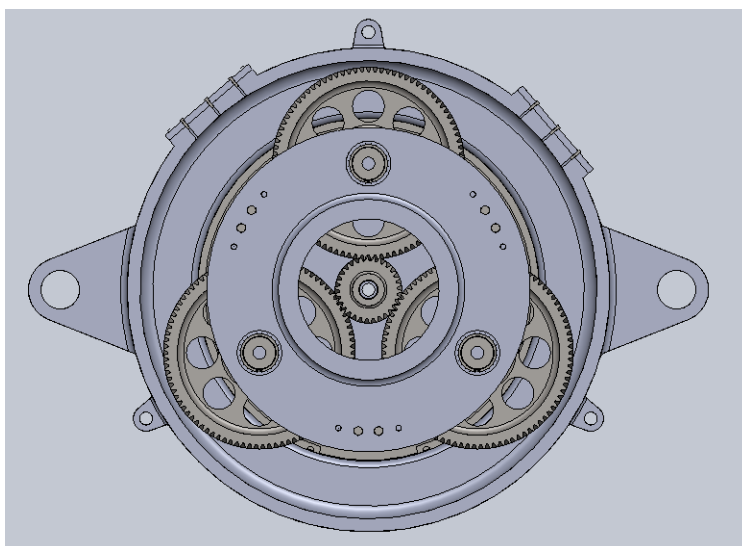


**Slika 70.** Detalj spoja dvaju dijelova nosača planeta zaticima



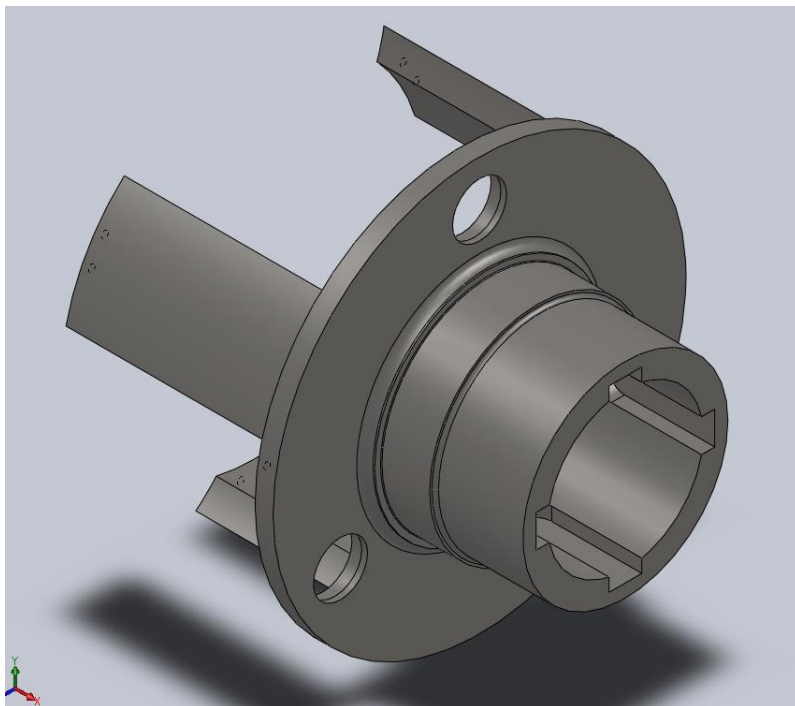
**Slika 71. Detalj spoja dvaju dijelova nosača planeta vijcima**

Dva dijela nosača planeta međusobno su spojena vijcima i zaticima. Vijci služe da se dva dijela kućišta međusobno pritegnu dok zatici služe za prenošenje eventualnih smičnih sila koje bi se mogle pojaviti između dva dijela nosača planeta. Načelno ne bi trebalo doći do pojave ikakvih smičnih sila iz razloga što se sile koje bi mogle uzrokovati takva opterećenja prenose na drugim mjestima, konkretno na zupčaničkim parovima između prstena i planeta, te planeta i sunčanika. Slike 70 i 71 prikazuju detalje tih spojeva dok slika 72 prikazuje pogled na unutarnji nosač planeta s jasno vidljivim vijcima i zaticima. Zatici imaju provrt u sredini iz razloga montaže, da zrak koji bi mogao biti stlačen prilikom utiskivanja zatika u vanjski nosač planeta ne izbije zatik iz položaja u koji je stavljen, nego da zrak prođe kroz provrt u zatiku.

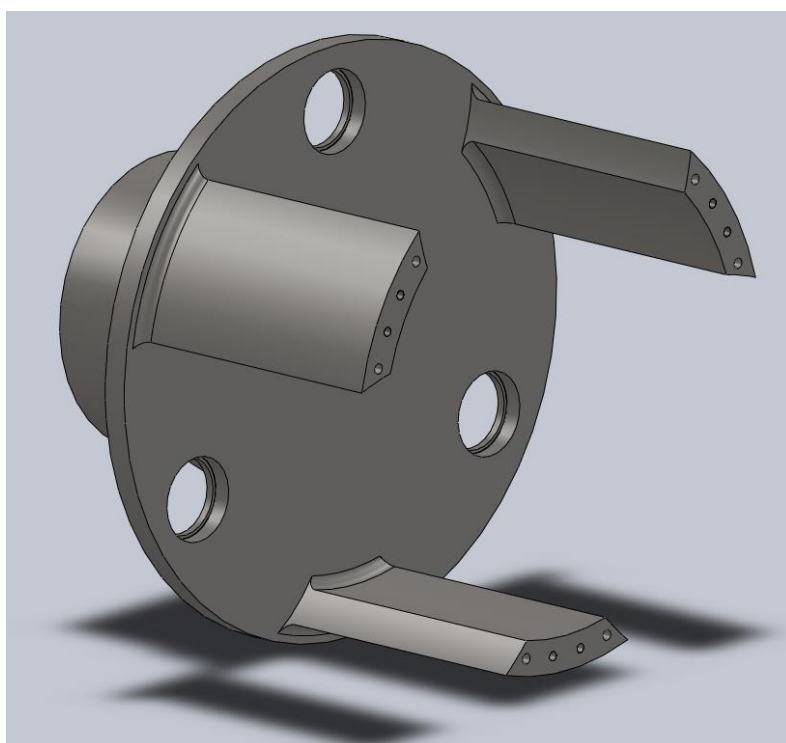


**Slika 72. Pogled na unutarnji nosač planeta s vidljivim vijcima i zaticima koji međusobno spajaju unutarnji i vanjski nosač planeta**



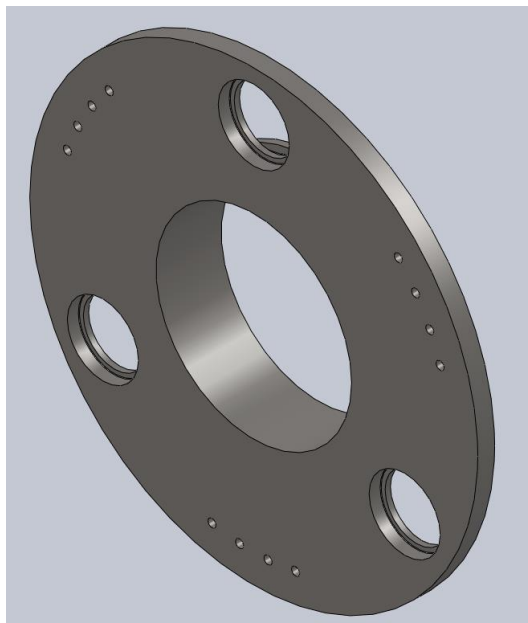


**Slika 73. Vanjski nosač planeta u izometriji**

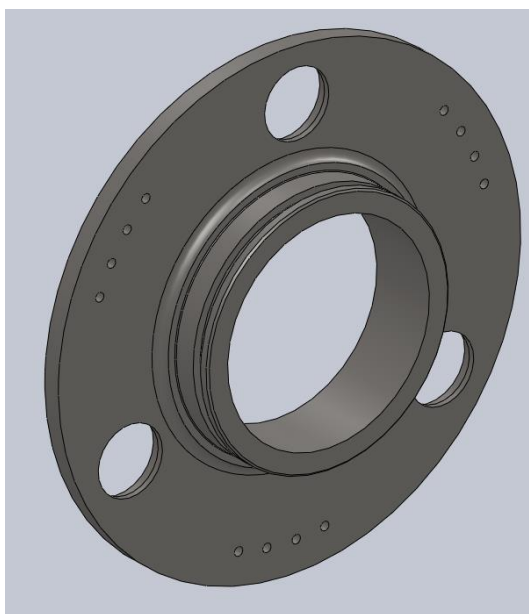


**Slika 74. Vanjski nosač planeta u drugom pogledu**

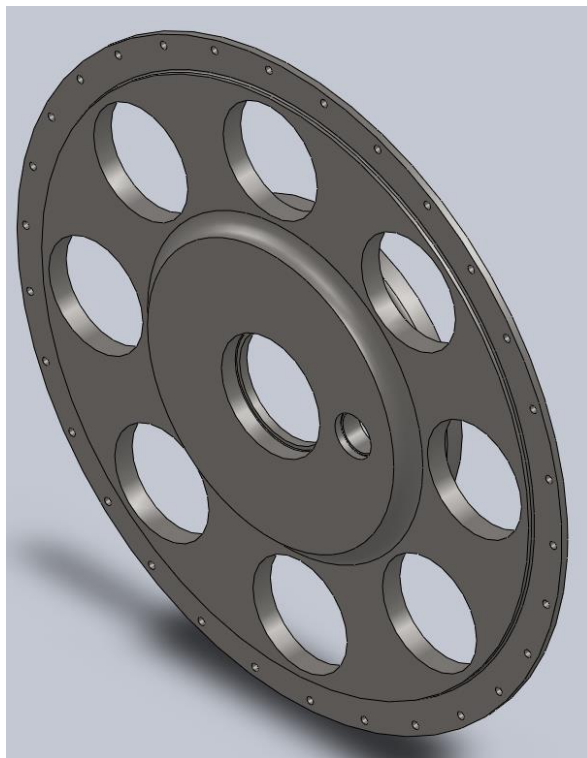
Slike 73 i 74 prikazuju vanjski nosač planeta. Točna tehnologija izrade tog dijela je nešto što bi se još trebalo detaljno utvrditi. Dakle, hoće li cijeli nosač biti napravljen lijevanjem iz jednog komada, a potom doraden na glodalici, ili će tri dijela koja služe da se vanjski nosač planeta poveže s unutarnjim biti zavarena na osnovnu konstrukciju koja će biti izlivena.



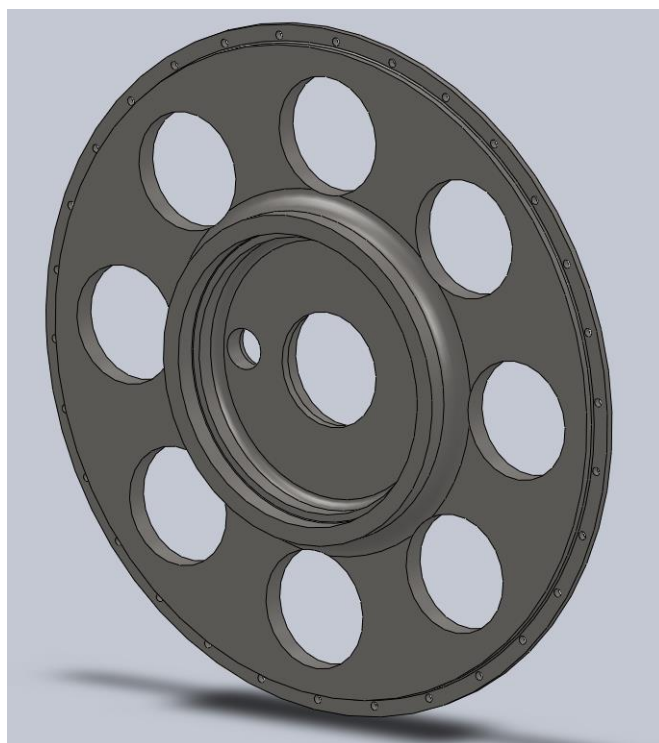
**Slika 75. Unutarnji nosač planeta u izometriji**



**Slika 76. Unutarnji nosač planeta u drugom pogledu**

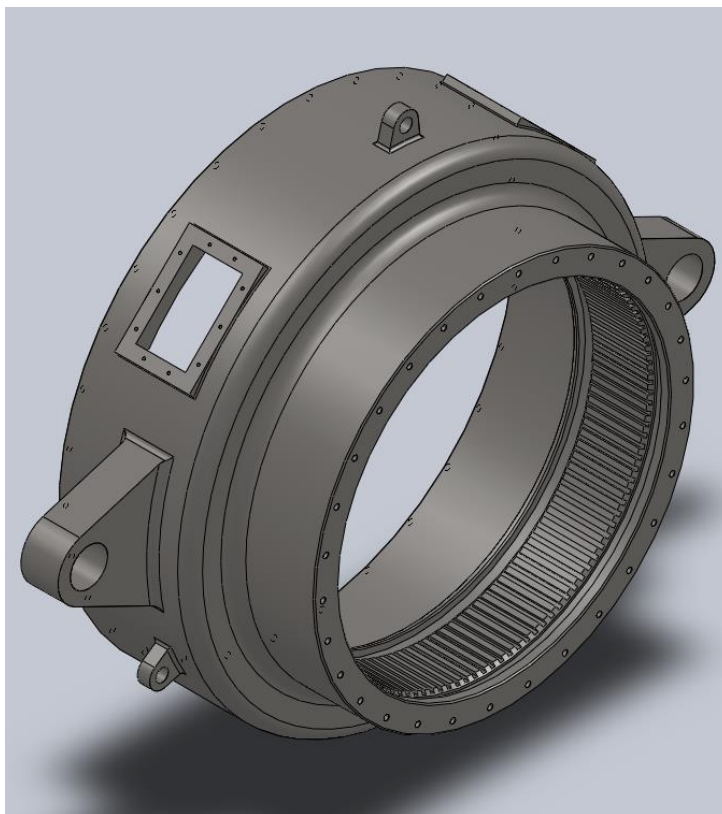


**Slika 77. Unutarnji međupoklopac u izometriji**

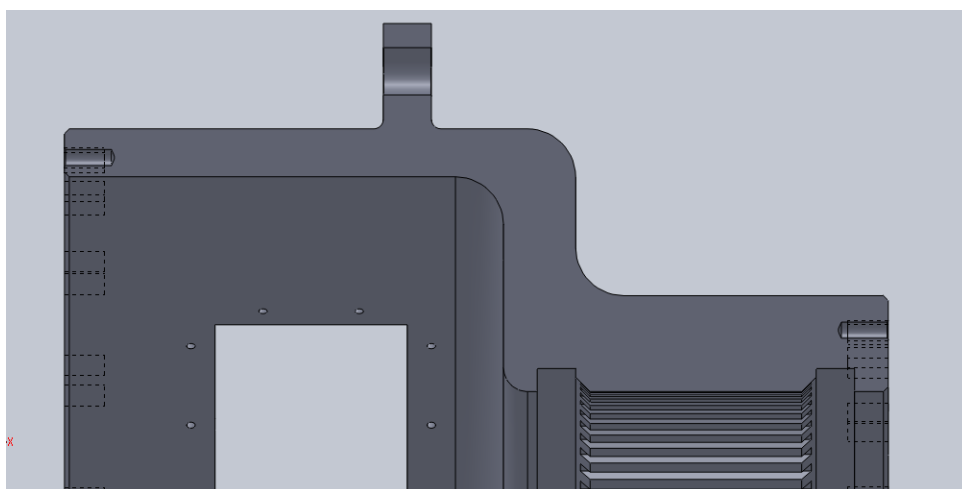


**Slika 78. Unutarnji međupoklopac u drugom pogledu**

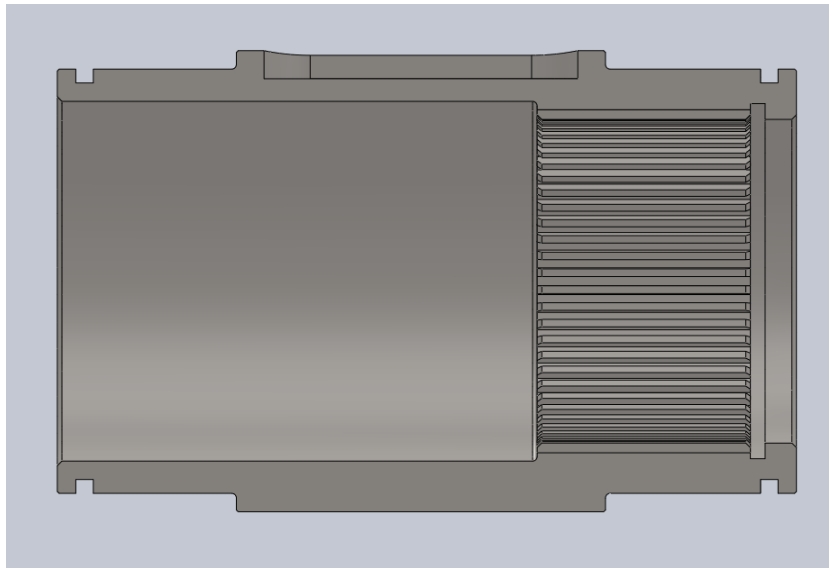
Unutarnji međupoklopac prikazan na slikama 77 i 78 služi za uležištenje nosača planeta s jedne strane odnosno dvaju vratila zadnjeg stupnja s druge strane, što je također vidljivo i na slikama 59 i 64.



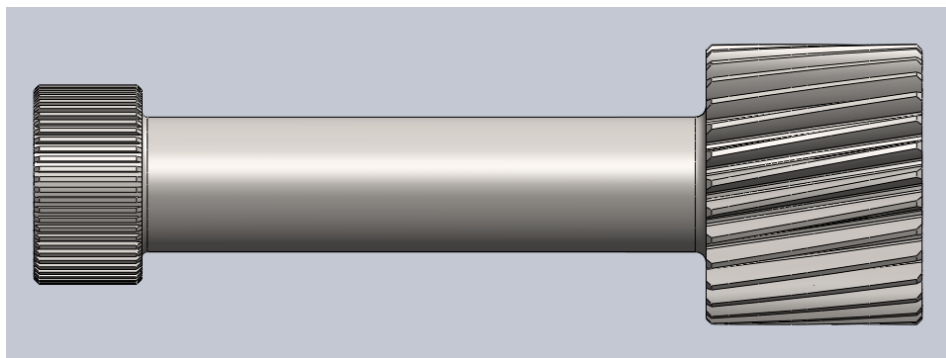
**Slika 79. Srednji dio kućišta**



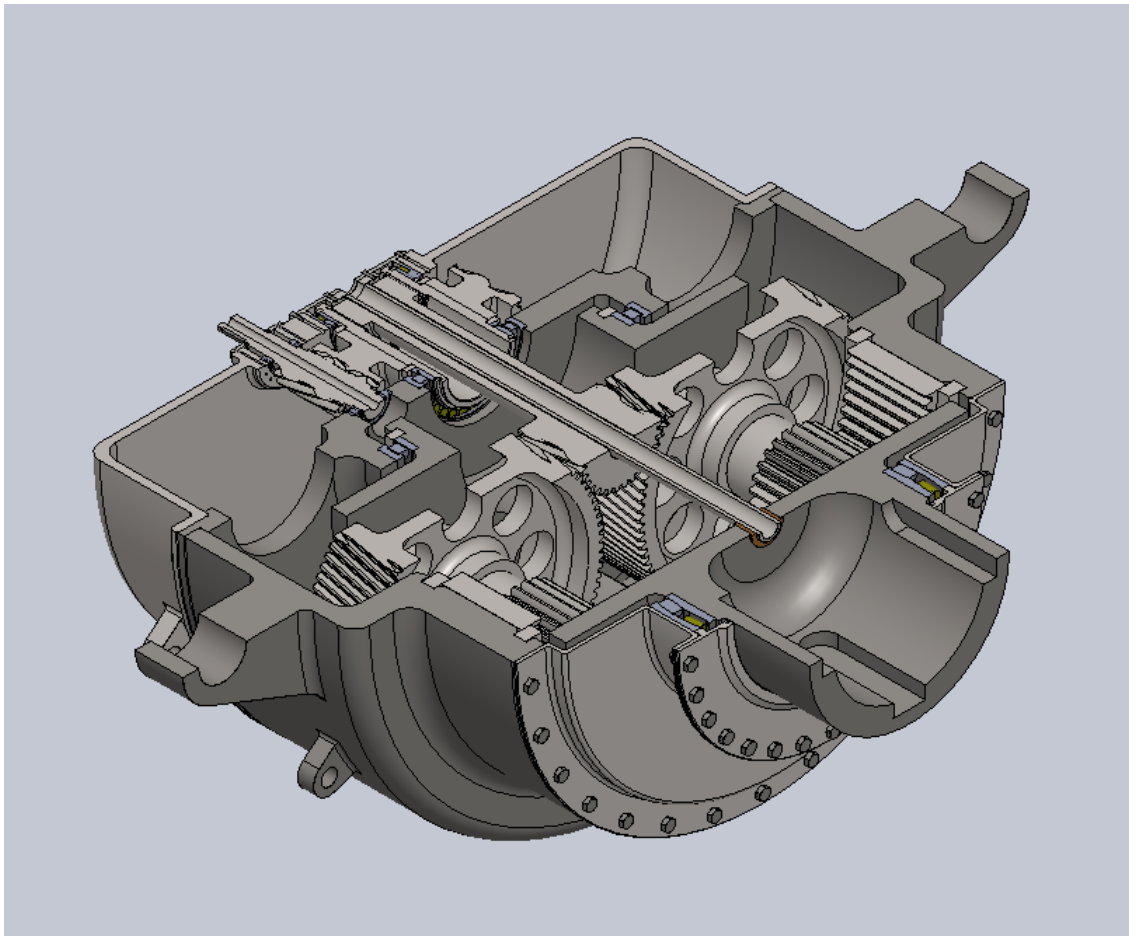
**Slika 80. Detalj presjeka srednjeg dijela kućišta**



**Slika 81. Veće vratilo zadnjeg stupnja**



**Slika 82. Sunčanik  $z_4$**



**Slika 83. Presjek multiplikatora u tlocrtu, pogled u izometriji**

## 5. ZAKLJUČAK

Kao što je već i napisano u uvodnom dijelu, multiplikator vjetroatregata je važan i još uvijek neizostavan modul mnogih postrojenja vjetroatregata. Proračun, konstrukcija i izrada multiplikatora vjetroatregata je složen zadatak za čije izvršenje je potreban čitav niz znanja iz cjelokupnog područja strojarstva. Ovaj diplomski rad dotaknuo se samo jednog dijela ukupnog posla potrebnog da se napravi takav multiplikator koji se koristi u vjetroatregatima tvrtke *General Electrics*.

Daljnja razrada ovog diplomskog zadatka sastojala bi se od detaljnog proračuna svih komponenti s ciljem optimizacije svake komponente multiplikatora u smislu zahtjeva za čvrstoćom i optimalnog izbora materijala zupčanika s ciljem smanjenja zupčanika. Nadalje, optimalnog izbora materijala ostalih dijelova multiplikatora s ciljem postizanja što je moguće manje mase i zauzimanja što manjeg prostora. Optimalnog izbora materijala obzirom na zahtjeve na zaštitu od korozije, te što je moguće ekonomičnijom tehnologijom izrade. Dodatno, bilo bi potrebno razraditi sustav podmazivanja i hlađenja multiplikatora.

Ovaj diplomski rad je na temelju relativno malo dostupnih podataka o multiplikatoru vjetroatregata imao za cilj detaljno razraditi sve elemente konstrukcije multiplikatora i može poslužiti kao dobra osnova za daljnu detaljnu razradu, optimizaciju, te konačnu izradu konkretnog multiplikatora vjetroatregata.

## LITERATURA

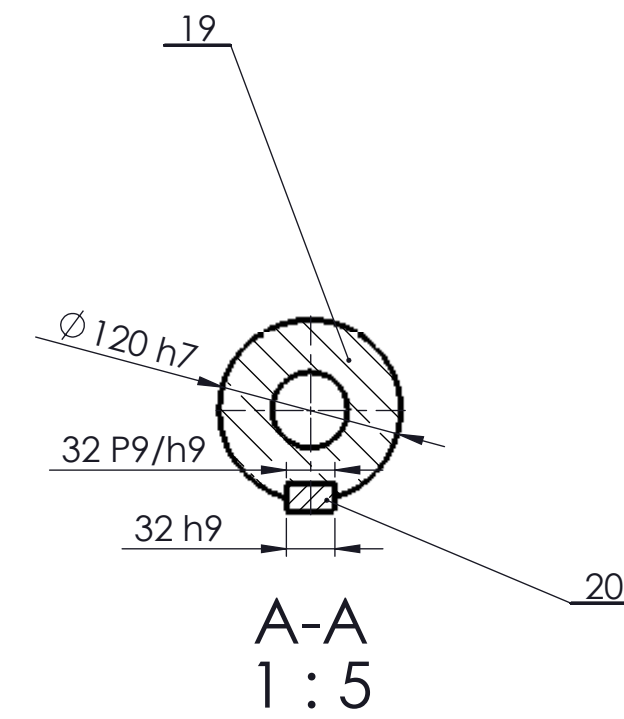
- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design), 3. 1. 2014.
- [2] Električni strojevi i pogoni, Skalicki, B., Grilec, J., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2005.
- [3] Active drive train control to improve energy capture of wind turbines, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Haro, N., Boise State University, 2007.
- [4] Vjetroelektrane – razvoj i konstrukcijska rješenja, Čičak, I., Benčić, G., Končar – Inženjering za energetiku i transport d.d., Zagreb, 2010.
- [5] Prijenosnici snage i gibanja, Opalić, M., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišni udžbenik, Zagreb, 1998.
- [6] [http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/en/tour/wtrb/powtrain.htm](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/en/tour/wtrb/powtrain.htm), 4. 1. 2014.
- [7] <http://eetweb.com/wind/heading-off-gearbox-failure-0811/>, 4. 1. 2014.
- [8] GE Drivetrain Technologies, Wind Turbine Gearbox Systems, Brochure
- [9] <http://machinedesign.com/article/green-technology-inside-an-advanced-wind-turbine-0605>, 4. 1. 2014.
- [10] Active drive train control to improve energy capture of wind turbines, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Haro, N., Boise State University, 2007.
- [11] <http://www.romaxtech.com/>, 4. 1. 2014.
- [12] <http://www.designworldonline.com/Modular-Bearing-System-for-Planetary-Wind-Turbine-Gearboxes/#>, 4. 1. 2014.
- [13] <http://www.nke.at/en/>, 4. 1. 2014.
- [14] United States Patent, Patent No.: US 7,008,348 B2, Date of Patent: Mar. 7, 2006., Inventor: LaBath, O., Cincinnati, OH (US), Assignee: General Electric Company, Schenectady, NY (US)
- [15] Planetni prijenosi, Orlić, Ž., Orlić, G., Zigo – Rijeka, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2006.



- [16] SKF, online katalog, [http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=en&newlink=1\\_6\\_1](http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=en&newlink=1_6_1), 4. 1. 2014.
- [17] GE Transportation Drivetrain Technologies, CP 1.8 Wind Turbine Gearbox
- [18] Lubrycation System Design and Run In Practices, Armbruster, R., Wind Turbine Condition Monitoring Workshop, GE Transportation, 2009.
- [19] Asinkroni strojevi i pogoni, Žarko, D., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju, Elektromehaničke i električne pretvorbe energije, Zagreb
- [20] Generatori za vjetroelektrane, trendovi u primjeni i hrvatska proizvodnja, Ban, D., Žarko, D., Maderčić, M., Tomičić, B., Študir, J., Čulig, Z., Petrinić, M., Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRE, Cavtat, studeni 2007.
- [21] Vjetroelektrane – razvoj i konstrukcijska rješenja, Čičak, I., Benčić, G., Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – CIRED
- [22] Pogon asinkronog generatora s dvostranim napajanjem u prijelaznim stanjima vjetroelektrane, Dizdarević, N., Energetski institut Hrvoje Požar, Hrvatska, Zagreb
- [23] Elementi strojeva, treće izmijenjeno i dopunjeno izdanje, Decker, K. - H., Golden makreting, Tehnička knjiga, Zagreb, 2006.
- [24] Ozubljenja i zupčanici, Oberšmit, E., Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, SNL, Zagreb, 1982.
- [25] Reduktor, Proračun i konstrukcija jednostupanjskog zupčanog prijenosnika, Opalić, M., Rakamarić, P., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za elemente strojeva i konstrukcija, Zagreb
- [26] Vratilo (Proračun), Horvat, Z. i suradnici, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za elemente strojeva i konstrukcija, Zagreb
- [27] <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/product-tables.html>
- [28] Krautov strojarski priručnika, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disk
- II. Tehnička dokumentacija

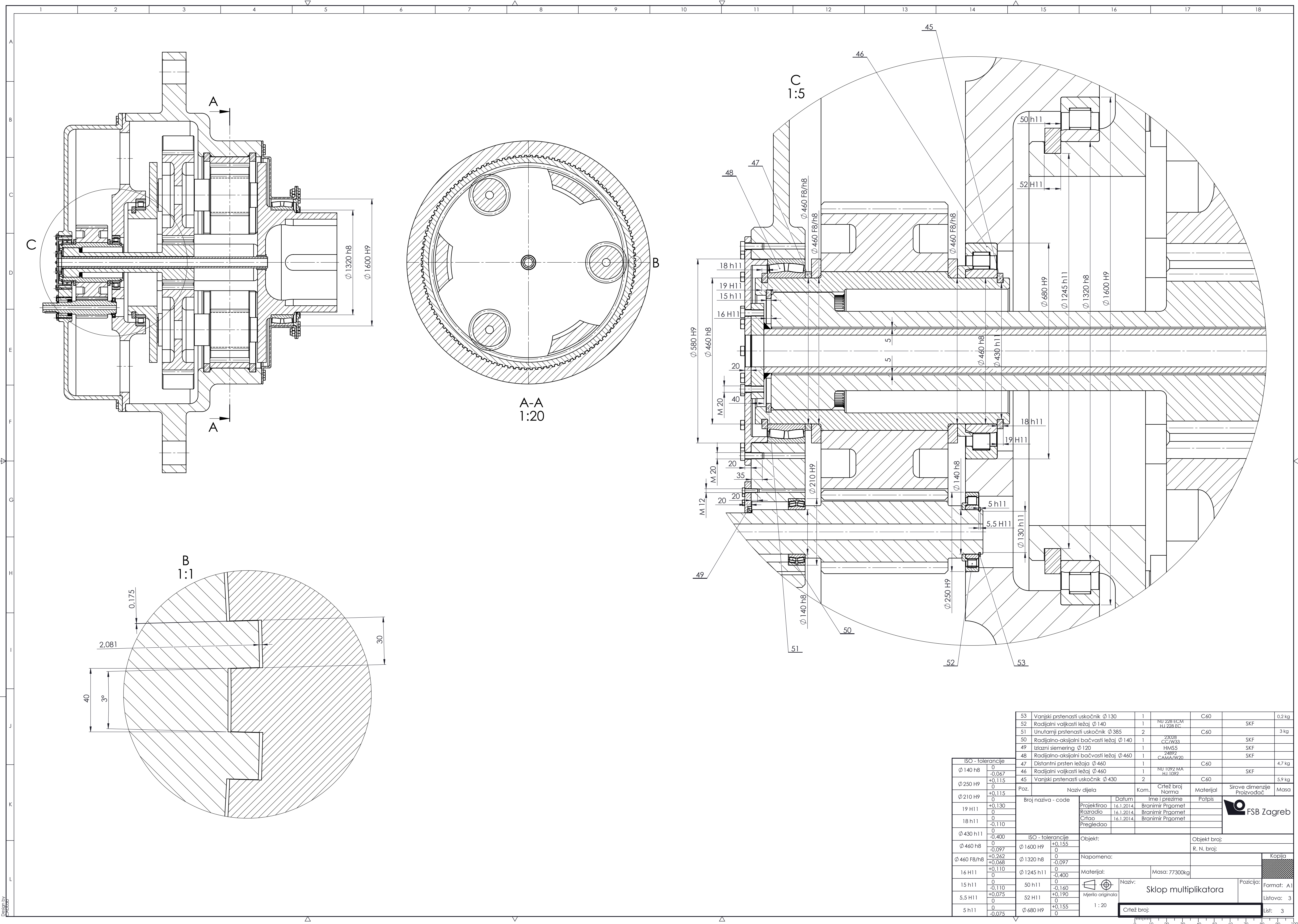


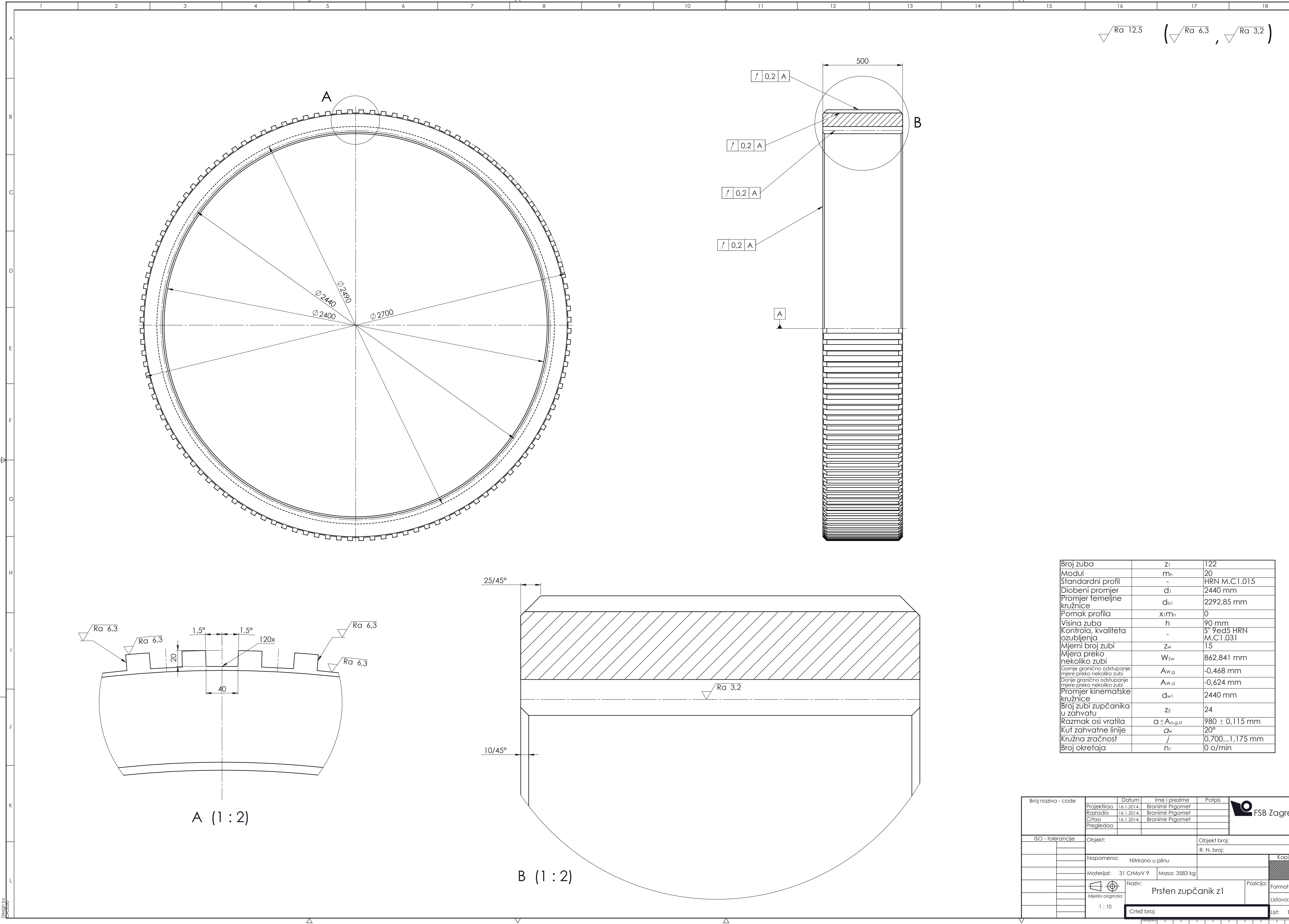
20	Pero DIN 6885 A32x18x40	1	DIN 6885				
19	Zupčanik z6 - izlazno vratilo	1		31CrMoV9		172.5 kg	
18	Vijak DIN 4018 M12x40	16	DIN 4018				
17	Vijak DIN 4018 M20x60	8	DIN 4018				
16	Vijak DIN 4018 M20x55	16	DIN 4018				
15	Vijak DIN 4018 M20x65	10	DIN 4018				
14	Vijak DIN 4018 M42x160	30	DIN 4018				
13	Vijak DIN 4018 M20x80	20	DIN 4018				
12	Vijak DIN 4018 M42x100	30	DIN 4018				
11	Matica DIN 4034 M42	30	DIN 4034				
10	Vijak DIN 4018 M42x100	30	DIN 4018				
9	Poklopac izlaznog vratila	1		C60		9.4 kg	
8	Poklopac izlaznog dijela kućišta	1		C60		73.6 kg	
7	Ulazni poklopac	1		C60		339.2 kg	
6	Pregledni poklopac izlaznog dijela	1		C60		58.8 kg	
5	Pregledni poklopac srednjeg dijela	1		C60		197.4 kg	
4	Izlazni dio kućišta	1		C60		7436.3kg	
3	Srednji dio kućišta	1		G-XZCRNiMo N17-13-5		24857kg	
2	Ulazni dio kućišta	1		C60		1324.4kg	
1	Ulazni nosač planeta	1		G-XZCRNiMo N17-13-5		10561kg	
Poz.	Naziv dijela		Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis		
Projekтирао		16.1.2014.	Branimir Prgomet				
Razradio		16.1.2014.	Branimir Prgomet				
Crtao		16.1.2014.	Branimir Prgomet				
Pregledao							
ISO - tolerancije				Objekt:		Objekt broj:	
200 P9	-0.050			Napomena:		R. N. broj:	
	-0.165						
∅300 H8	+0.081	Materijal:		Masa: 77300kg		Kopija	
	0						
∅120 h7	-0.035	Mjerilo originala		Sklop multiplikatora		Format: A1	
	+0.034						
32 P9/h9	-0.088	1 : 20		Crtež broj:		Pozicija:	
32 h9	-0.088						
						Listov: 3	





ISO - tolerancije	22	Radikalno-akksijski bačvasti ležaj Ø 1320		1				SKF
Ø 180 H7/s6	-0.069	21	Ulazni stimering Ø 1250,95	1	526618			SKF
Ø 140 E9/h9	-0.133	Poz.	Naziv dijela		Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač
13 h11	+0.285	Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime		Polisip
12 h11	+0.085	Projektirao		16.1.2014.		Bronimir Pragmet		 <b>FSB Zagreb</b>
Ø 241 h11	0	Razradio		16.1.2014.		Bronimir Pragmet		
Ø 260 h8	0	Crtao		16.1.2014.		Bronimir Pragmet		
Ø 400 H9	-0.043	Pregledao						
Ø 360 H9	-0.250	ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
Ø 360 H9	0	100 J8/h9		Napomena:		R. N. broj:		
Ø 360 H9	-0.081	Ø 500 H7/m6		Materijal:		Masa: 77300kg		
Ø 360 H9	+0.140	100 P9/h9		Naziv:		Sklop multiplikatora		Kopija
Ø 360 H9	0	Ø 45 F7/h6		Mjerilo originala		Pozicija:		Format: A
Ø 360 H9	+0.102	Ø 45 F7/h6		1 : 20		Crtež broj:		Listova: 3
Ø 360 H9	-0.018	Ø 260 F8/h8						List: 2







Broj zuba	Z <sub>1</sub>	122
Modul	m <sub>n</sub>	20
Standardni profil	-	HRN M.C1.015
Diobeni promjer	d <sub>i</sub>	2440 mm
Promjer temeljne kružnice	d <sub>b1</sub>	2292,85 mm
Pomak profila	x <sub>1</sub> m <sub>n</sub>	0
Visina zuba	h	90 mm
Kontrola, kvaliteta ozubljenja	-	S <sup>9</sup> ed5 HRN M.C1.031
Mjerni broj zubi	Z <sub>w</sub>	15
Mjera preko nekoliko zubi	W <sub>zw</sub>	862,841 mm
Gornje granično odstupanje mjere preko nekoliko zubi	A <sub>w,g</sub>	-0,468 mm
Donje granično odstupanje mjere preko nekoliko zubi	A <sub>w,d</sub>	-0,624 mm
Promjer kinematske kružnice	d <sub>w1</sub>	2440 mm
Broj zubi zupčanika u zahvatu	Z <sub>2</sub>	24
Razmak osi vratila	a ± A <sub>a,g,d</sub>	980 ± 0,115 mm
Kut zahvatne linije	α <sub>w</sub>	20°
Kružna zračnost	f	0,700...1,175 mm
Broj okretaja	n <sub>1</sub>	0 o/min

Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime		Potpis		 FSB Zagreb	
		16.1.2014.		Branimir Prgomet					
		16.1.2014.		Branimir Prgomet					
		16.1.2014.		Branimir Prgomet					
Projekтирао		16.1.2014.		Branimir Prgomet					
Razradio		16.1.2014.		Branimir Prgomet					
Crtao		16.1.2014.		Branimir Prgomet					
Pregledao									
ISO - tolerancije		Objekt:				Objekt broj:			
						R. N. broj:			
		Napomena:				Kopija			
		Nitirano u plinu							
		Materijal:		31 CrMoV 9		Masa: 3583 kg			
				Naziv:			Pozicija:		Format: A1
		Mjerilo originala		Prsten zupčanik z1					Listova: 1
		1 : 10							List: 1
		Crtaj broj:							



